

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**APLICAÇÃO DE PROCESSO OXIDATIVO
AVANÇADO (H₂O₂/UV) NO EFLUENTE DE UMA ETE
PARA FINS DE REUSO**

Maurício Polezi

Campinas

2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**APLICAÇÃO DE PROCESSO OXIDATIVO
AVANÇADO (H₂O₂/UV) NO EFLUENTE DE UMA ETE
PARA FINS DE REUSO**

Maurício Polezi

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Guimarães

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Comissão de pós-graduação da
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil, na área de
concentração de Saneamento e
Ambiente.**

Campinas, SP

2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P758a	<p>Polezi, Maurício</p> <p>Aplicação de processo oxidativo avançado (H₂O₂/UV) no efluente de uma ete para fins de reuso / Maurício Polezi.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.</p> <p>Orientador: José Roberto Guimarães.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.</p> <p>1. Radiação ultravioleta. 2. Águas residuais – Purificação - Oxidação. I. Guimarães, José Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.</p>
-------	---

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DE PROCESSO OXIDATIVO
AVANÇADO (H₂O₂/UV) NO EFLUENTE DE UMA ETE
PARA FINS DE REUSO.

Maurício Polezi

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. José Roberto Guimarães

Presidente e Orientador – Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp

Prof. Dr. Sidney Seckler Ferreira Filho

Escola Politécnica da USP

Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani

Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp

Campinas, 04 de Agosto de 2003.

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais,
Leontino e Thereza;
a minha irmã, Kátia;
ao meu sobrinho, Hermano;
e a minha querida Janaina
dedico esta Dissertação.*

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. José Roberto Guimarães, pela orientação, apoio, amizade e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

A amiga Elide Patella, pelo apoio, estímulo, confiança e ajuda para poder iniciar e realizar este trabalho.

A SABESP – MC nesses últimos anos de trabalhos, em especial ao Hélio Padula por permitir a continuação do trabalho, e por nossa amizade.

A amiga Marta Regina Inoue, pela amizade, pelas dicas e suporte no nosso trabalho dentro da SABESP.

Ao amigo Francisco Paracampas pela amizade e apoio para realização do trabalho.

Aos amigos Paulo Nobre e Beth, sempre dispostos a ajudar, por toda a suas experiências, colaboração, e pelas sugestões, que foram de grande importância.

A amiga Erica Cisar por todo auxílio na elaboração dos desenhos.

Aos amigos Edison Souza Dias e Geraldo de Jesus, pelo ajuda na montagem dos equipamentos e realização dos testes.

A todos os amigos do laboratório da SABESP-MCEC, pelo auxílio na realização das análises, em especial ao Hermes e a Teresa, que acompanharam diretamente os ensaios.

Aos amigos Hector, Márcio e Flávio, responsáveis pela ETE Jesus Neto que permitiram o uso das instalações para realização dos ensaios.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Tratamento de Águas Residuárias	5
3.2. Reuso	7
3.2.1. Conceitos	10
3.2.2. Padrões de qualidade	13
3.3. Oxidação Química usada no Tratamento de Águas	17
3.4. Processos Oxidativos Avançados (POA)	18
3.4.1. POA em sistemas Homogêneos	22
3.4.2. UV	23
3.4.3. Peróxido de Hidrogênio	25
3.4.4. Processo H ₂ O ₂ /UV	27

4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. Localização do Experimento	31
4.2. Aparato Experimental.....	35
4.3. Análises	39
4.4. Reagentes.....	40
4.5. Métodos	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. Resultados da Fase I	45
5.2. Resultados da Fase II	48
5.2.1. Processo UV	49
5.2.2. Processo H_2O_2	50
5.2.3. Processo H_2O_2 /UV	51
5.3. Estudo de degradação de compostos orgânicos.....	68
5.4. Cálculos para fins de projeto	71
5.4.1. H_2O_2	71
5.4.2. UV	72
5.4.3. Consumo de Energia Elétrica	74
5.5. Cálculo de Custos	77
6. CONCLUSÃO.....	84
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO I.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Sistema de Lodos Ativados	6
Figura 4.1: Fluxograma da ETE Jesus Neto.....	32
Figura 4.2: Vista dos Tanques de Aeração da ETE	33
Figura 4.3: Vista do Decantador Secundário.....	34
Figura 4.4: Esquema do Experimento	36
Figura 4.5: Visão do Efluente do Lodos Ativados com a bomba utilizada.....	37
Figura 4.6: Vista do reservatório de 60 L que era cheio com o efluente	37
Figura 4.7: Sistema Montado com o rotâmetro e reator de UV	38
Figura 4.8: Visão dos frascos para coleta das amostras.....	38
Figura 5.1: Experimento 8: 30L de solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H ₂ O ₂	58
Figura 5.2: Experimento 9: 30L de solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H ₂ O ₂	58
Figura 5.3: Variação do valor de ORP	59
Figura 5.4: Experimento 10: 60L de solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H ₂ O ₂	62
Figura 5.5: Experimento 11: 60L de solução, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H ₂ O ₂	62
Figura 5.6: Variação do valor do ORP	63

Figura 5.7: Foto do efluente dentro do reservatório antes de iniciar o processo de tratamento	64
Figura 5.8: Foto do efluente dentro do reservatório após 3 horas de recirculação	65
Figura 5.9: Foto da comparação das amostras antes e depois do tratamento	65
Figura 5.10: Foto da comparação das amostras antes e depois do tratamento	66
Figura 5.11: Experimento 12: 60L de solução com adição de Benzeno e Tolueno, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H ₂ O ₂	70
Figura 5.12: Alternativa 1 – Lâmpadas de 65 W	78
Figura 5.13: Alternativa 2 – Lâmpadas de 102 W	79
Figura 9.1: Resultados de Cor Aparente da Água de Reuso	93
Figura 9.2: Resultados de Turbidez da Água de Reuso.....	93
Figura 9.3: Resultados de pH da Água de Reuso	94
Figura 9.4: Resultados de DQO da Água de Reuso.....	94
Figura 9.5: Resultados de COT da Água de Reuso	95
Figura 9.6: Resultados de Condutividade da Água de Reuso.....	95
Figura 9.7: Resultados de Cloro Total da Água de Reuso	96
Figura 9.8: Resultados de Coliformes Totais da Água de Reuso	96
Figura 9.9: Resultados de Coliformes Fecais da Água de Reuso	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Padrões de qualidade de água para receração de contato primário	14
Tabela 3.2: Padrões de qualidade de água para receração de contato secundário.....	15
Tabela 3.3: Critérios de tratamento da Califórnia para água de Reuso não potável	16
Tabela 3.4: Sistemas típicos de processos oxidativos.....	20
Tabela 3.5: Potenciais redox de alguns agentes oxidantes.....	22
Tabela 3.6: Equivalentes valores de concentrações de H_2O_2	26
Tabela 3.7: Uso do processo H_2O_2 /UV	29
Tabela 4.1: Resumo dos Experimentos	42
Tabela 5.0: Parâmetros de Qualidade média do período 200-2002	44
Tabela 5.1: Resultados do experimento 1: concentração de 40 mg/L H_2O_2	45
Tabela 5.2: Resultados do experimento 2: concentração de 70 mg/L H_2O_2	46
Tabela 5.3: Resultados do experimento 3: concentração de 40 mg/L H_2O_2	47
Tabela 5.4: Resultados do experimento 4: 30L, vazão 30 LPM	49
Tabela 5.5: Resultados do experimento 5: 30L, vazão 30 LPM	50
Tabela 5.6: Resultados do experimento 6: 30L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2	52
Tabela 5.7: Resultados do experimento 7: 30L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2	52

Tabela 5.8: Resultados do experimento 8: 30L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2	55
Tabela 5.9: Resultados do experimento 9: 30L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2	56
Tabela 5.10: Resultados do experimento 10: 60L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2	60
Tabela 5.11: Resultados do experimento 11: 60L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2	61
Tabela 5.12: Resultados do experimento 12: 60L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2	69
Tabela 5.12: Custos de Implantação	80
Tabela 5.13: Custos de Insumos	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

APHA-AWWA	American Public Health Association – American Water Works Association
BETX	Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xileno
C	Concentração dos parâmetros
Co	Concentração do parâmetro da amostra branco
COT	Carbono Orgânico Total
CV	Cavalos Vapor
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
gb	Global
h	Horas
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
ISSO	International Standard Organization
J	Joule
L	Litros
L.A.	Lodos Ativados
LPM	Litros por Minuto
MCEC	Divisão de Controle Sanitário Centro
min	Minutos

μ	Micro
nm	Nanômetro
NTU	Unidade Nefelometrica de Turbidez
NMP	Número Mais Provável
O ₃	Ozônio
ORP	Potencial de redução e oxidação
P.A.	Para Análise
PAC	Policloreto de Alumínio
POA	Processo Oxidativo Avançado
ppb	Parte por Bilhão
s	Segundos
SABESP	Compania de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
RAFA	Reator de Fluxo Ascendente
TiO ₂	Dióxido de Titânio
UC	Unidade de Cor
Un	Unidade
US	Ultra-som
UV	Ultravioleta
W	Watts

RESUMO

Polezi, Maurício. **Aplicação de Processo Oxidativo Avançado (H_2O_2 /UV) no Efluente de uma ETE para fins de Reuso**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 97p. Dissertação de Mestrado.

Buscando pesquisar processos alternativos para o tratamento terciário de efluentes, este trabalho estudou a aplicação de um processo oxidativo avançado, POA, (H_2O_2 /UV) para o tratamento terciário de um efluente doméstico para fins de reuso com o objetivo de reduzir o valor inicial de cor aparente, turbidez, organismos patogênicos, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT), verificando se a qualidade final da água atenderia as metas estabelecidas para estes parâmetros na água de reuso.

Soluções do efluente foram submetidas ao tratamento proposto utilizando-se um reator comercial com lâmpada de luz ultravioleta (102 W) e volume útil de 5,4 L. As soluções foram recirculadas no reator a uma vazão de 30 L/min durante 4 horas. Foram estudadas diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio e também variado o tempo de reação através do aumento do volume do efluente estudado.

Pelos resultados obtidos no presente estudo, observou-se que o POA H_2O_2 /UV, é um processo de tratamento que pode ser aplicado no tratamento do efluente da ETE Jesus Neto para fins de reuso.

Sendo as dosagens que forneceram os melhores resultados de 20 mg/L H_2O_2 e um tempo de exposição a Luz UV de 10,8 min. Obtendo-se taxas de remoção aproximadas de Cor aparente, DQO, COT e Turbidez de 50; 50; 40; 20% respectivamente e também a inativação de coliformes atingindo a ausência dos mesmos. Conseguiu-se a degradação de Benzeno e Tolueno com redução de até 97%.

ABSTRACT

Polezi, Maurício. **Use of an Advanced Oxidation Process ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) in the Effluent from a Wastewater Treatment Plant seeking its reuse.** Campinas, Civil Engineering College, State University of Campinas, 2003. 97p. Master Degree Dissertation.

Aiming to study alternative processes for wastewater tertiary treatment, this study evaluated the use of an advanced oxidation process, AOP, ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) in the tertiary treatment of domestic wastewater, seeking its reuse. The AOP application intended to reduce the following initial parameters: color, turbidity, pathogenic organisms, conductivity, chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC). The resulting water quality was determined and compared to the limits established for these parameters in the water for reuse.

The proposed treatment was performed in the wastewater solutions, inside a commercial reactor equipped with an ultraviolet light bulb (102 W), featuring a useful volume of 5.4 L. The solutions were circulated inside the reactor at a volume rate of 30 L/min during 4 hours. The following variables were evaluated: different hydrogen peroxide concentrations and reaction time variation by the increase in the volume of the wastewater sample.

Observing the results in the experiment, it was determined that the AOP $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ treatment could be used for the Jesus Neto wastewater treatment plant, seeking its reuse.

The determined best results was 20 mg/L of H_2O_2 with an ultraviolet light exposure time of 10,8 min. The AOP achieved removal ratios for color, COD, TOC, and Turbidity of roughly 50; 50; 40; 20%, respectively, as well as the inactivation of coliforms, reaching its total absence. Benzene and Toluene degradation was also observed, achieving up to 97% reduction ratio.

1. INTRODUÇÃO

Inserido no conceito de Saúde Pública, que é a ciência e a arte de promover, proteger e recuperar a saúde, utilizando-se de medidas de alcance coletivo e de motivação da população, tendo como principais meios de ação a medicina preventiva e social e o saneamento do meio, o saneamento básico é a parte do saneamento do meio que trata dos problemas ligados ao abastecimento de água, manejo dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos.

Entre a disposição de recursos naturais, a água aparece como um dos mais importantes para o homem, sendo indispensável para sua sobrevivência.

Realmente a água constitui os dois terços da massa do homem e até os nove décimos da massa dos vegetais. Ela é indispensável ao homem como bebida e como alimento, para sua higiene e como fonte de energia, matéria-prima de produção, via para os transportes e base das atividades recreativas que a vida moderna reclama cada vez mais.

As disponibilidades de água doce não são ilimitadas, logo é indispensável preservá-las e controlá-las. Como consequência da explosão demográfica e do rápido aumento das necessidades na agricultura e na indústria moderna, os recursos hídricos constituem objeto de uma demanda crescente. Não é possível satisfazer essa demanda, nem elevar o nível de vida, se cada um dos cidadãos não considerar a água um bem precioso, que é necessário preservar e utilizar racionalmente.

Quando a água, depois de ser utilizada, é restituída ao seu ambiente natural, a mesma não deve comprometer os possíveis usos que podem ser feitos, tanto públicos como privados. A contaminação é uma modificação da qualidade da água, provocada geralmente pelo homem, de tal forma a torná-la inapta ou danosa ao consumo por parte do homem, à indústria, à agricultura, à pesca, às atividades recreativas, aos animais domésticos e aos selvagens.

Entende-se por poluição das águas a adição de substâncias que, direta ou indiretamente, alterem a natureza do corpo d'água de uma maneira tal que prejudique os legítimos usos que dele são feitos.

Esta definição é essencialmente prática e, em decorrência, potencialmente polêmica, pelo fato de associar a poluição ao conceito de prejuízo e aos usos do corpo d'água, conceitos esses atribuídos pelo próprio homem. No entanto, esta visão prática é importante, principalmente ao se analisar as medidas de controle para a redução da poluição. Devido aos diversos agentes poluidores, são causadas inúmeras doenças (SPERLING,1996).

Portanto, após os recolhimentos dos esgotos, os mesmos devem ser encaminhados até à Estação de Tratamento de Esgoto e passar por vários métodos de tratamento, que dividem-se em operações e processos unitários, e a integração destes compõe os sistemas de tratamento.

Tendo em vista o aumento do consumo de água tratada para uso das indústrias e da população, e com isso aumentando o volume de esgoto gerado e não utilizáveis, a idéia da valorização dos efluentes, como forma de aumentar a oferta de água na região onde ela é escassa, e/ou como alternativa à disposição final dos esgotos onde essa disposição é problemática, vem sendo crescentemente considerada como uma possibilidade cada vez mais atraente. De forma geral, o reuso da água pode ocorrer de forma direta ou indireta, por meio de ações planejadas ou não planejadas (MANCUSO, 1992).

No Brasil, apenas recentemente se deu início em projetos de reuso de efluentes de estação de tratamento de esgoto para uso não potável industrial. Um exemplo disso é a Estação de Tratamento de Esgoto Jesus Netto da Sabesp, que no ano de 1999 implantou o processo de reuso de efluentes domésticos para fins industriais.

Devido a sua localização estratégica no polo industrial Móoca-Ipiranga, iniciou-se o processo de tratamento terciário no efluente a fim de melhorar a qualidade do mesmo para utilizá-lo em reuso. Essa água de reuso foi oferecida aos clientes potenciais, sendo que um deles, a COATS CORRENTE, interessou-se e firmou contrato com a SABESP para recebimento dessa água de reuso.

Essa água de reuso tem de atender os padrões de qualidade requeridos, tanto no aspecto sanitário quanto no de metas específicas para seu uso final. Logo, novos tipos de tratamentos devem ser avaliados para poder atender e melhorar a qualidade requerida.

Neste ponto entram os processos oxidativos avançados (POA) que podem ser utilizados no tratamento terciário, pois destroem os poluentes ao invés de simplesmente mudá-los de fase. Nos POA há a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que são altamente oxidantes (NOGUEIRA e GUIMARÃES, 1999). São processos de fácil operação e podem degradar compostos não-biodegradáveis. Dentre os principais POA, nesse projeto de pesquisa será destacado o processo de peroxidação assistida por luz ultravioleta.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho será uma proposta de aplicação de um POA ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) para o tratamento terciário de um efluente doméstico para fins de reuso.

Para alcançar o objetivo foram avaliados os seguintes aspectos:

1. Estudar a remoção de cor aparente, turbidez, inativação de coliformes, condutividade, DQO e carbono orgânico total (COT), a fim de atingir a meta estabelecida para estes parâmetros.
2. Realizar ensaios de concentração de ORP a fim de verificar uma alternativa para acompanhar a reação.
3. Avaliar e estimar a dose de UV e H_2O_2 , para fins de projeto
4. Estimar os custos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tratamento de Águas Residuárias:

Os processos de tratamento de águas residuárias estão relacionados às características da água, como o grau de tratamento requerido. A seleção do tipo de processo a ser utilizado ou da combinação de processos depende dos seguintes aspectos:

- Característica do afluente
- Qualidade requerida do efluente
- Área física disponível
- Custos associados

Os métodos de tratamento podem ser classificados em (SPERLING, 1996):

- *Tratamento Primário*: operações físicas: métodos de tratamento no qual predomina a aplicação de forças físicas como gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação.
- *Tratamento Secundário*: processos biológicos unitários: métodos de tratamento nos quais a remoção de contaminantes ocorre por meio de atividade biológica para remoção da matéria orgânica carbonácea, desnitrificação e remoção de fósforo.

Dentre esses processos destaca-se o de Lodos Ativos, onde o princípio básico deste sistema é que os sólidos são recirculados do fundo da unidade de decantação, por meio de bombeamento, para a unidade de aeração, provocando aumento da concentração de bactérias (SPERLING, 1996). Na figura 3.1 é mostrado o sistema.

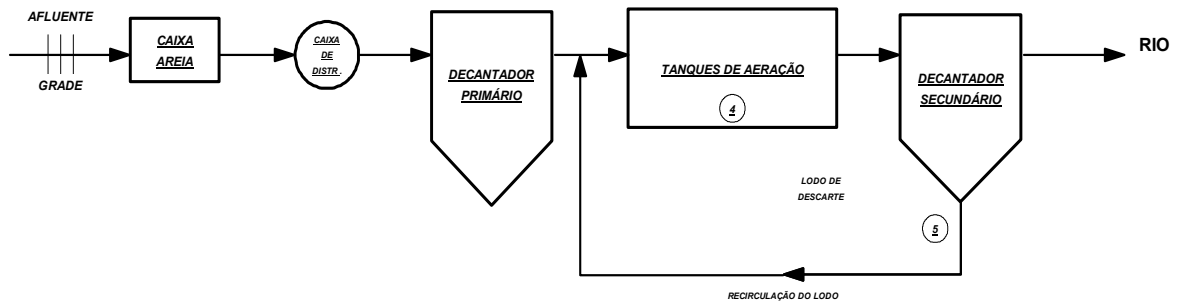


Figura 3.1: Sistema de Lodos Ativos

Tratamento Terciário: processos químicos unitários: métodos de tratamento nos quais a remoção ou conversão de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos ou devido a reações químicas como precipitação, adsorção e oxidação química.

3.2. Reuso

Devido ao grande crescimento demográfico e a industrialização, principalmente nas grandes metrópoles (áreas urbanas), ocorre o problema da escassez de água potável. Pois há um aumento na demanda de consumo da água tratada para uso das indústrias e da população, provocando também o aumento do volume de esgotos gerados e não reutilizados.

Nas grandes metrópoles, na maioria dos casos, não há como aumentar a produção da água tratada devido a falta ou a não viabilidade de outras fontes de água.

Como forma de equalizar essa demanda para as necessidades urbanas muitos países já estão fazendo a reutilização dos efluentes para fins industriais, recreacionais, serviços domésticos, construção, etc, ou seja, para fins menos nobres do que para consumo humano (OKUN, 1991). Como exemplos, podemos citar (SHUVAL, 1977):

- **ÍNDIA:** Um dos países mais populosos do mundo, também é um dos que mais sofrem com a escassez de água. Uma aplicação bem incomum é esta técnica que se usa em edifícios comerciais altos, variando de 20 a 25 andares, em Bombay na Índia. A necessidade para tal reuso é complementar o sistema de ar condicionado desses edifícios.

A água refrigerada é recirculada por uma torre localizada no topo do edifício e abastece entre 150 a 250 m³/dia dependendo do tamanho do prédio, que por causa da escassez de água lança mão desse recurso.

O esgoto bruto que vem dos apartamentos é conduzido ao processo de tratamento, que é constituído por: gradeamento, aeração prolongada, decantação, filtro de areia e cloração. O efluente tratado, livre de cheiro, é bombeado para o reservatório no topo do prédio, de onde é distribuído para o sistema de ar condicionado.

- **ESTADOS UNIDOS:** Na Califórnia no final da década de 60, o lençol subterrâneo que abastece a região já estava super explorado pela irrigação de extensas plantações de laranja. Com a redução do nível do aquífero, o sal do Oceano Pacífico começou a infiltrar-se ali, ameaçando o abastecimento. O condado fica no deserto e depende totalmente da água subterrânea.

Para revitalizar o manancial foi criada uma usina-piloto de tratamento especializada em purificar esgoto e injetá-lo de volta no solo, para reabastecer o lençol. Portanto, além de permanecer cheio, não há perigo de água salgada contaminar o manancial.

No subsolo, a água, devidamente tratada, acaba diluindo-se na água fresca, e as rochas do subsolo, que são porosas, ajudam a filtrar naturalmente toda a massa líquida. Tornando-se assim, uma água apropriada para o consumo potável, de acordo com os critérios de abastecimento local.

- **JAPÃO:** No Japão aproximadamente 130.000 m³/dia de efluentes urbanos são tratados em nível avançado e usados por indústrias no Japão. Isto acontece nos distritos de Koh-Toh e Joh-Hoko, em Tóquio e na cidade de Nagoya. Em Nagoya e Koh-Tok, além do tratamento secundário são utilizados a coagulação, a sedimentação, filtração rápida em areia e cloração. Em Hoh-Hoku, além dos processos descritos, utiliza-se também carvão ativado. Sendo que a maior parte da água é utilizada para resfriamento de equipamentos e limpeza (REUSODEAGUA, 2003).

- **ISRAEL:** Um canal central de uma cidade densamente povoada à costa central transporta as suas águas servidas para o sul, para uma área de irrigação situada em Negev. Foi proposto como alternativa para complementar o abastecimento das plantações. De acordo com um plano feito por Tahal (1972), entre 100 a 160 milhões de m³ por ano, de esgoto podem ser transportados, através de um canal de cimento, com diâmetro variando de 20 a 48 polegadas de diâmetro, de Netania no norte para Dorot no sul que perfaz uma distância de cerca de 140 km.

As condições climáticas em Negev não são muito favoráveis, mas as condições geológicas facilitam o deslocamento. Cerca de 6.000 ha de algodão, 20.000 ha de trigo, e 7.500 ha de sorgo podem ser irrigados por fluxo anual de 120 milhões de m³. Vale lembrar, que sem esta irrigação, esta área seria quase improdutiva, devido a secas freqüentes.

O custo calculado da água (excluindo tratamento) até o ponto de uso está entre 20 a 30 centavos (U.S) por 1000 galões.

Da Cidade de Jerusalém, são desviados uns 10 milhões de m³ por ano de efluentes de lodo ativado tratados para a área de Gazaza a uns 51 km da cidade. Nesta região a água servida irriga aproximadamente 1800 hectares de algodão e 600 hectares de cereais por ano até 1985 (Balashe Yalon 1973). O reservatório tem capacidade de armazenamento de cerca de 3 milhões de m³.

No Brasil, ainda é recente o reuso de efluentes das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) para esses fins. Como exemplo, podemos citar, além da ETE Jesus Neto, a ETE ABC (SABESP) que fornece água de reuso para a prefeitura de São Caetano, a qual utiliza a água de reuso para lavagem de ruas e rega de jardins.

3.2.1. - Conceitos

Após o uso da água potável, esta é descartada e conduzida a uma estação de tratamento de esgotos pela rede coletora de esgoto sanitário. O esgoto tratado pode ser descartado nos corpos d'água ou ter um tratamento adicional, visando obter uma água para fins não potáveis. Após obter o nível de tratamento necessário para os padrões de reuso, a água será conduzida aos locais de consumo por outras tubulações que não são as da rede pública de abastecimento de água. Estas tubulações são denominadas redes duplas de distribuição.

Logo, o reuso da água ocorre quando o esgoto sanitário, depois de sofrer um tratamento adicional ao realizado nas estações de tratamento de esgoto, é conduzido, pelas redes duplas de distribuição, ao local de consumo. Os padrões de qualidade para o reuso são estabelecidos em função de tipo de consumo e do nível de exposição humana a água.

Segundo MANCUSO (1992), o reuso pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações planejadas ou não.

- **Reuso Potável Direto** : é o caso em que o esgoto é recuperado utilizando-se de tratamento avançado é injetado diretamente no sistema de água potável. Atualmente, no Brasil não é recomendado este procedimento devido:
 - a) a tecnologia disponível torna o custo proibitivo.
 - b) inexistência de conhecimento em amplitude e profundidade necessários sobre o rol de poluentes e contaminantes.
 - c) a dificuldade em controlar a qualidade da água processada pode trazer riscos inaceitáveis à população.

- **Reuso Potável Indireto** : o esgoto após tratamento é lançado nos corpos d'águas superficiais ou subterrâneas, onde fatores como a diluição e reaeração, promovem a purificação natural do recurso hídrico, viabilizando sua captação, tratamento e consumo como água potável.
- **Reuso Não Potável Agrícola** : o efluente das estações de tratamento de esgotos (ETE), convenientemente condicionado, é utilizado para a irrigação da agricultura de sustento ou forrageira e ou para a dessedentação de animais, sendo que, na maioria das vezes, ocorre a recarga do lençol freático.
- **Reuso Não Potável Industrial** : trata-se do reuso do efluente das ETE, convenientemente condicionado por tratamento posterior se necessário nos processos industriais. Sendo as indústrias as maiores consumidoras de água, o reuso afigura-se como uma alternativa tentadora.

As principais aplicações da água de reuso nas indústrias são:

- Resfriamento de equipamentos e caldeiras
- Lavagem de peças
- Limpeza de banheiros e pátios
- Combate a incêndio
- Descargas de sanitários
- Produção de materiais

Outra forma de reuso industrial é a praticada dentro da própria indústria, onde a água é reutilizada o maior número de vezes que for possível, antes de ser finalmente descartada. Essas instalações de reciclo de água industrial (internas) são de iniciativa da própria indústria, cabendo ao Estado controlar a qualidade e/ou quantidade do efluente descartado.

- **Reuso Não Potável Recreacional** : classificação reservada à irrigação de plantas ornamentais, campos de esporte, parques, lagoas ornamentais, etc.
- **Reuso Não Potável Doméstico**: são considerados aqui os casos de reuso de água para rega de jardins residenciais, para descargas sanitárias, lavagem de carros e a utilização deste tipo de água em grandes edifícios.

3.2.2. Padrões de qualidade

O reuso de efluentes exige o conhecimento das características físicas, químicas e biológicas dos mesmos de modo a adequar seu tratamento para a obtenção da qualidade que satisfaça os critérios recomendados ou os padrões que tenham sido fixados para determinado uso. Embora de forma dispersa, informações sobre a qualidade da água para reuso podem ser encontradas com relativa abundância na literatura especializada. Quanto ao grau de atendimento à legislações depende fundamentalmente da capacitação tecnológica dos laboratórios, da confiabilidade e da repetitividade dos dados das análises realizadas. Ao mesmo tempo devem ser implantadas metodologias para estudos epidemiológicos e toxicológicos, de tal forma que a avaliação dos riscos do reuso de efluentes possa ser confiável, atual e continuamente realizada (MANCUSO 1998).

- **Reuso Potável Direto**: conforme recomenda a World Health Organization, os critérios e padrões de qualidade são os de potabilidade de cada país. No Brasil é a Portaria 1469 do Ministério da Saúde.
- **Reuso Não Potável Agrícola** : Essa prática envolve risco, já que os esgotos municipais podem conter metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos de origem industrial e uma enorme variedade de microrganismos patogênicos. Esse fato, somado às infinitas nuances e características particulares de cada projeto, de cada tipo de produto agrícola, de cada tipo de solo, de clima, de topografia, etc., torna o estabelecimento de padrões de qualidade uma tarefa impossível sem que se faça uma série de considerações.

- **Reuso Não Potável Recreacional** : há uma dificuldade em estabelecer um padrão de qualidade tanto como no reuso não potável agrícola, desta vez devido a sua utilização mais específica, que relaciona-se ao tipo de contato com o ser humano, sendo:

- 1) **Contato primário**: imersão corporal prolongada, como a piscina. Nesse caso a qualidade da água deve ser livre de substâncias tóxicas ou irritantes à pele e aos olhos e livre de patógenos, além de manter padrões de natureza estética.

Tabela 3.1: Padrões de qualidade de água para recreação de contato primário

Parâmetro	Valor
Microorganismos aquáticos	Ausentes
Coliformes fecais (NMP/100mL)	200
Transparência Secchi (m)	1,2
DQO (mg/L)	30
Cor (UC)	Ausente
Espuma e Materiais Flutuantes	Ausente
Odor	Ausente
Óleos (mg/L)	Ausente
pH	6,5 – 8,3
Fosfato (mg/L)	0,2
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	Ausente
Sólidos em Suspensão (mg/L)	5
Temperatura mínima (° C)	15
Temperatura máxima (° C)	35

Fonte: MANCUSO, 1998

2) Contato Secundário: onde ocorre a submersão do corpo humano por curtos e ocasionais períodos, por exemplo, nos lagos. Nesse caso a qualidade da água deve ser isenta de sólidos em suspensão, lodos, limos, cor, odor, sabor, turbidez, espuma, óleos e graxas, acidez ou alcalinidade.

Tabela 3.2: Padrões de qualidade de água para recreação de contato secundário

Parâmetro	Valor
Microorganismos aquáticos	Virtualmente Ausentes
Coliformes Totais (NMP / 100ml)	100
DQO (mg/L)	60
Espuma e materiais flutuantes	Virtualmente Ausentes
Odor	Virtualmente Ausentes
Óleos (mg/L)	Virtualmente Ausentes
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Aeróbio
pH	6,5 - 8,3
Sólidos decantáveis (mg/L)	Virtualmente Ausentes

Fonte: MANCUSO, 1998

- **Reuso Não Potável Industrial** : dependendo do processo, os padrões podem ser mais ou menos exigentes, podendo-se citar casos como água para caldeiras onde os requisitos são mais restritivos que para água potável, o que deve ser objeto de estudo e negociação, na referência aos aspectos de venda da água processada.

Dada a especificidade dos requisitos em função dos processos industriais, não há como detalhar padrões de qualidade de água para reuso, entretanto, é pertinente observações de caráter de saúde pública como o uso de sistemas duplos de distribuição, por meio da diferenciação de cores e avisos impressos nas tubulações, que não seja aqueles usados pelo sistema de distribuição de água potável, evitando riscos de ingestão accidental. A "World Health Organization" recomenda que a água deve ser livre de sólidos grosseiros, de parasitas, de bactérias e apresentar baixa concentração de vírus, para que no caso de ingestão accidental não cause nenhum problema.

Como exemplo pode-se verificar as exigências do Departamento de Saúde da Califórnia, EUA, referente aos critérios básicos de tratamento e qualidade para reuso não potável, conforme tabela 3.3 (OKUN, 1991).

Tabela 3.3: Critérios de tratamento da Califórnia para água de Reuso não potável

Uso de coagulante (polímero a base de alumínio)	Requerido, ao menos que a turbidez do efluente < 5 NTU
Mistura Rápida	Alta energia
Material Filtrante	Antracito e areia
Tamanho Efetivo	Antracito : 1,0 – 1,2 mm Areia: 0,55 – 0,6 mm
Profundidade Filtrante	0,92 m
Taxa de Filtração	12 m/h
Cloro Residual	Mínimo de 5 mg/L após 2 horas
Tempo de Contato do Cloro	2 horas
Coliformes, NMP/100 mL	Máximo de 2,2
Turbidez após filtração, NTU	Máximo de 2

Fonte : OKUN, 1991

- **Reuso Não Potável Doméstico:** como nesta modalidade de reuso a água é distribuída utilizando-se sistemas duplos, valem aqui as observações feitas para reuso não potável industrial.

3.3. Oxidação Química usada no Tratamento de Águas

Oxidantes químicos têm um importante papel no tratamento de águas e podem ser adicionados em vários pontos do processo de tratamento dependendo do propósito a serem utilizados (remoção de cor, controle de gosto e odor, redução de compostos orgânicos específicos, precipitação de metais, destruição de microorganismos).

O processo de oxidação envolve a troca de elétrons entre as espécies químicas, mudando o estado oxidativo (valência) das espécies envolvidas. O processo de oxidação química refere-se as reações de oxi-redução (redox) porque uma substância é oxidada, perde elétrons, enquanto a outra espécie é reduzida, ganha elétrons (AWWA, 1990). Os principais oxidantes químicos utilizados no tratamento de água são:

- Cloro
- Hipocloritos
- Cloraminas
- Dióxido de Cloro
- Permanganato de Potássio
- Ozônio
- Peróxido de Hidrogênio

O tratamento de águas, com presença de contaminantes orgânicos, por oxidação química é freqüentemente mais caro do que o tratamento biológico. Mas em certas circunstâncias, porém, sistemas de oxidação química podem ser usados economicamente para tratar substâncias orgânicas que são tóxicas ou recalcitrantes a microrganismos, servindo como etapas de pré-tratamento para processos biológicos ou processos de transformação de contaminantes orgânicos ou inorgânicos a produtos ambientalmente aceitáveis (WEBER e LeBOUEF, 1999).

3.4. Processos Oxidativos Avançados (POA)

Os POA são definidos como os processos com potencial de produzir radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente oxidantes, em quantidade suficiente para mineralizar matéria orgânica a dióxido de carbono, água e íons inorgânicos. Os radicais hidroxila podem ser obtidos a partir de oxidantes fortes, como H_2O_2 e O_3 , combinados ou não com irradiação.

Atualmente, tem-se uma falta de estudos para utilização em larga escala dos Processos Oxidativos Avançados, pois a maioria dos estudos são em escala de laboratório e poucos deles são voltados para a análise dos custos envolvidos, visando a passagem para escala industrial. Além disso, uma outra dificuldade é comparar os diferentes trabalhos da literatura, mesmo que seus objetivos sejam semelhantes. Isto se deve ao fato dos parâmetros de estudo serem muitos e terem uma grande variabilidade de um trabalho para outro.

Como exemplo, de aplicação de POA pode-se citar o Japão, que tem pesquisado e utilizado um dos vários POA, que trata-se do dióxido de titânio na presença de luz ultravioleta, para vários fins. Um deles é a utilização como bactericida em banheiros, ou seja, impregna-se os azulejos com dióxido de titânio, o fotocatalisador, e sob irradiação UV sobre os azulejos os mesmos mantêm-se limpos e isentos de microrganismos. O mesmo acontece com placas de sinalização de estradas, que também são impregnadas com dióxido de titânio e sob irradiação UV natural, do Sol, comportam como um sistema auto limpantes. Também esse semiconductor são impregnados nas paredes de túneis de auto estradas e iluminados com luz ultravioleta para degradação dos compostos tóxicos liberados pelos motores dos carros (FUJISHIMA, HASMIMOTO e WATANABE, 1999).

No Brasil existe vários centros de pesquisas e Universidades que estão desenvolvendo trabalhos e pesquisas envolvendo Processos Oxidativos Avançados. Nos congressos de engenharia sanitária e ambiental, engenharia química e química é crescente a apresentação de trabalhos envolvendo esse tema. Em 2001, no Brasil, foi realizado o “I Encontro Sobre Aplicações Ambientais de Processos Oxidativos Avançados”, com a apresentação de 10 conferências e 47 trabalhos técnicos/científicos, com a presença de vários pesquisadores internacionais. O segundo encontro já está sendo preparado para o mês de agosto/2003, com, pelo menos, 75 trabalhos a serem apresentados.

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a formação dos radicais hidroxila. Estes processos podem ser:

Homogêneos - Catalisador e substrato formam uma única fase.

Heterogêneos - O substrato e o catalisador formam um sistema de mais de uma fase. Geralmente são processos que possuem catalisadores na forma sólida.

Os sistemas homogêneos e heterogêneos podem também estar submetidos ou não a irradiação. Desta forma, diversos sistemas podem ser utilizados, dentre os quais os mais típicos podem ser vistos na tabela 3.4. (HUANG, DONG, TANG, 1993).

Tabela 3.4: Sistemas típicos de processos oxidativos avançados

Sistemas Homogêneos		Sistemas Heterogêneos	
Com irradiação	Sem irradiação	Com irradiação	Sem irradiação
O ₃ /UV	O ₃ /H ₂ O ₂	TiO ₂ /O ₂ /UV	Eletro-fenton
H ₂ O ₂ /UV	O ₃ /OH ⁻	TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	
Feixe de elétrons	H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (Fenton)		
US			
H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (Foto-Fenton)			
H ₂ O ₂ /US			
UV/US			

Fonte: HUANG, DONG, TANG, 1993

Os POA podem ser utilizados como pré-tratamento de um processo biológico para destruição de contaminantes resistentes a biodegradação, ou após o tratamento biológico para melhoria da qualidade do efluente final antes de ser despejado em corpos receptores (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001).

Abaixo são descritas as principais vantagens do uso dos POA:

- Não trocam somente de fase o contaminante (como ocorre no arraste por ar e tratamento com carvão ativado, ou seja, “air stripping”), e sim o transformam quimicamente.
- Geralmente se consegue a mineralização completa (destruição) do contaminante.
- Usualmente não geram lodo que requer um processo de tratamento ou disposição.
- São muito úteis para contaminantes refratários que resistem a outros métodos de tratamento, principalmente o biológico.

- Servem para tratar contaminantes em concentração muito baixa (por exemplo, ppb).
- São ideais para diminuir a concentração de compostos formados por pré-tratamentos alternativos, como a desinfecção.
- Geralmente, melhoram as qualidades organolépticas da água tratada.
- Em muitos casos, consomem menos energia que outros métodos (por exemplo, a incineração).
- Eliminam os efeitos sobre a saúde humana provocada por desinfetantes e oxidantes como o cloro.

Como desvantagens, pode-se citar:

- Em alguns casos, podem formar subprodutos de reação.
- As vezes, tem-se grandes tempos de retenção, chegando a ser utilizado em reatores de batelada.
- Conforme o caso, os custos podem ser elevados quando comparado aos processos biológicos, por exemplo.
- É necessário mão de obra treinada de bom nível.

Os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) possuem propriedades adequadas para degradar todos os compostos orgânicos e reagir de 10^6 - 10^{12} vezes mais rápido que oxidantes alternativos como o O_3 . A tabela 3.5 apresenta os potenciais de oxidação de várias espécies, e pode-se observar que após o flúor, o radical livre $\bullet\text{OH}$ é o oxidante que possui o maior potencial de oxidação (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001).

Tabela 3.5: Potenciais redox de alguns agentes oxidantes

Espécie	E ⁰ (V, 25 °C)
Flúor	3,03
Radical Hidroxila (•OH)	2,80
Oxigênio Atômico	2,42
Ozônio	2,07
Peróxido de hidrogênio	1,78
Permanganato	1,68
Dióxido de Cloro	1,57
Ácido Hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Iodo	0,54

Fonte: DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001

3.4.1.: POA em Sistemas Homogêneos

Nestes sistemas geralmente utilizam-se processos de oxidação aliados a fotólise direta com ultravioleta (UV), visto que as reações de geração de radicais hidroxila em alguns casos são lentas, podendo ser auxiliadas pela fotólise, e, por outro lado, a fotólise direta atuando sozinha, em comparação com processos envolvendo geração de radicais hidroxila, tem, geralmente, uma eficiência mais baixa, e mesmo não ter nenhum efeito. Desta forma, geralmente, obtém-se uma melhor eficiência com os dois processos atuando de forma conjunta, como por exemplo: H₂O₂/UV, O₃/UV e H₂O₂/O₃/UV.

3.4.2.: UV

A luz ultravioleta (UV) por meio da interação com as moléculas causa, na maioria dos casos, uma ruptura nas ligações químicas podendo produzir a degradação de matérias orgânicas (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001).

Na desinfecção de água os microrganismos são inativados devido a reações fotoquímicas, ou seja, há absorção da luz a qual causa uma reação fotoquímica que altera os componentes moleculares essenciais da célula (EPA, 1999). PIRES (2002) estudou a desinfecção de esgotos através da radiação ultravioleta, constatando que a mesma pode ser utilizada levando-se em consideração o tempo de detenção hidráulico, concentração de sólidos em suspensão, a cor e a turbidez do efluente e que na maior parte do estudo a qualidade do efluente foi mais importante que a dose de radiação ultravioleta.

A luz, bem como outras radiações eletromagnéticas, compreende um fluxo de fótons, cuja quantidade de energia é definida pela equação 3.1:

$$E = hc / \lambda = h\nu, \text{ J} \quad (3.1)$$

Sendo E inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ), onde h é a constante de Plank, c é a velocidade da luz e ν é a frequência. J é a unidade Joule.

Para que ocorra fotólise (dissociação) de uma molécula pela absorção de um fóton, é necessário que a energia do fóton exceda a energia de ligação a ser clivada.

O espectro do UV é dividido em quatro bandas (EPA, 1999):

- UV-A : 315 a 400 nm
- UV-B : 280 a 315 nm
- UV-C: 200 a 280 nm
- UV-V: 100 a 200 nm

A radiação UV-A é também conhecida como luz negra. A radiação UV-C é normalmente utilizada para a desinfecção de águas devido a ação germicida na emissão a 254 nm.

A radiação UV-V ("Vacuum"), geralmente utiliza lâmpadas de Xe ($\lambda = 172$ nm) promove a fotólise da água, produzindo radicais hidroxilas e átomos de hidrogênio que irão degradar os contaminantes presentes na água, conforme a equação 3.2 (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001):



A geração de radiação UV é feita por lâmpadas de UV que podem ser classificadas (JARDIM, LITTER, 2002):

- Baixa Pressão: emitem comprimento de onda somente a 185 e 254 nm
Vaporização parcial do mercúrio
Potência 30 W, 65 W, 105 W
Vida útil, em geral, é de 5000 a 8000 horas (PIRES, 2002)
- Média Pressão: emitem comprimento de ondas de 180 a 400 nm
Vaporização total do mercúrio
Potência 5 kW

A maioria dos reatores de UV convencionais está disponível em dois tipos; isto é, recipiente fechado e canal aberto.

Para aplicações em água para consumo humano, o recipiente fechado é geralmente o reator de UV preferido devido as seguintes razões:

- menor área
- minimiza a poluição de material suspenso no ar
- mínima exposição de pessoal ao UV;
- simples instalação.

A geometria do reator influencia na eficiência da radiação pois não podem haver áreas mortas no reator. Para aumentar a eficiência do reator a turbulência da água é importante. A qualidade da água influencia também na eficiência do processo de absorção da radiação ultravioleta, sendo que a dureza causa problemas para manter a lâmpada limpa e funcional. As presenças de matérias dissolvidas ou em suspensão podem proteger microorganismos da ação da radiação (EPA, 1999).

3.4.3.: Peróxido de Hidrogênio

O Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) são soluções claras, incolores, e pode ser misturado com água em qualquer proporção. Em concentrações altas, tem um odor ligeiramente pungente ou ácido. Tem uma massa molar de 34,02; e não é inflamável em qualquer concentração. Pode-se observar os diferentes valores de concentração de H_2O_2 na tabela 3.6. (US Peroxide, 2001-2003).

Tabela 3.6: Equivalentes valores de concentrações

Massa (%)	Fração Molar	Molaridade (g.mol/L a 25 °C)	Molalidade (g.mol / kg)	Volume (%)
0	0,0000	0,000	0,0000	0,00
10	0,0556	3,034	3,266	34,03
20	0,1169	6,286	7,349	71,19
30	0,1850	9,770	12,599	110,96
40	0,2610	13,505	19,599	153,98
50	0,3462	17,511	29,398	199,49
60	0,4427	21,809	44,097	248,66
70	0,5527	26,421	68,595	301,46
80	0,6793	31,373	117,59	358,17
90	0,8266	36,692	264,58	419,16
100	1,0000	42,404		484,62

Fonte: US Peroxide, 2001-2003

O H_2O_2 tem sido utilizado para reduzir cargas de DBO/DQO em efluentes de esgoto industriais há muitos anos. Principalmente em situações específicas que justificam seu uso, as quais podem ser:

- Pré-digestão de esgotos que contém compostos tóxicos, inibitório ou recalcitrante ao tratamento biológico, como por exemplo, pesticidas, corantes, resinas.
- Em pré-tratamentos de esgotos antes de despejo na rede pública quando tratamentos biológicos não podem ser utilizados.
- Suplemento de oxigênio dissolvido (OD) quando ocorre sobrecarga temporária ou falha de equipamentos no sistema de tratamento.

A reação genérica para a redução de DBO/DQO pode ser expressa conforme a equação 3.3:



A quantidade teórica de H_2O_2 requerida é aproximadamente 2,1 libras (a 100%) por libra de DQO/DBO oxidado. Entretanto a eficiência da reação depende das características de cada efluente (US Peroxide, 2001-2003).

3.4.4.: Processo H_2O_2 /UV

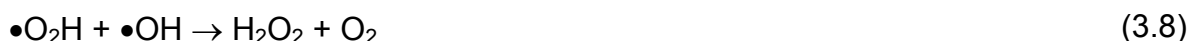
Nesse processo, a radiação emitida por lâmpadas ultravioleta com comprimentos de onda abaixo de 400 nm é capaz de fotolizar moléculas de H_2O_2 . O mecanismo aceito para a fotólise do peróxido de hidrogênio é a clivagem da molécula por fótons produzindo dois radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) (GIMÉNEZ et al., 2001), como mostrado na equação 3.4:



A fotólise do H_2O_2 se realiza quase sempre utilizando lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa e média pressão. Geralmente utiliza-se lâmpadas com emissão máxima em 254 nm, mas como a absorção do H_2O_2 é máxima a 220 nm, seria mais conveniente o uso de lâmpadas de Xe/Hg, mais caras, mas que emitem num intervalo de 210-240 nm.

É necessário estabelecer condições de fluxo turbulento para renovar continuamente a solução nas proximidades da fonte luminosa.

O excesso de peróxido e com altas concentrações de $\bullet\text{OH}$, ocorrem reações competitivas que produzem um efeito inibitório para a degradação. Os $\bullet\text{OH}$ são suscetíveis a recombinar-se ou de reagir de acordo com as seguintes equações:



As reações 3.5 e 3.8 consomem $\bullet\text{OH}$ e diminuem a probabilidade de oxidação. Se deve determinar a quantidade ótima de H_2O_2 , para evitar um excesso que poderia retardar a degradação (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001).

Em algumas aplicações, ácido é adicionado para baixar o pH do efluente e alterar o equilíbrio ácido carbônico-bicarbonato-carbonato, deslocando para a formação da forma mais ácida (H_2CO_3). Este equilíbrio é importante, pois íons de carbonato e bicarbonato são conhecidos seqüestradores de $\bullet\text{OH}$, provocando uma diminuição da eficiência do sistema (EPA, 1998).

O método $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ tem sido utilizado com êxito na remoção de contaminantes presentes nas águas e efluentes industriais.

GIMÉNEZ et al. (2001) estudaram a degradação de fenol utilizando o processo $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, sendo 1,5 L de solução aquosa de fenol no reator, com uma concentração de 93-114 mg/L. Obtendo-se uma remoção de 90,6% com exposição de 30 minutos e concentração de 7,41 mmol/L H_2O_2 , e com uma lâmpada de Xe com 1500 W de potência.

Na EPA (1998) são descritos vários trabalhos referentes ao uso do processo H_2O_2/UV , conforme dados colocados na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Uso do processo H_2O_2/UV (EPA, 1998)

Concentração do Contaminante	Condições do Teste	% Remoção	Informação Adicional	Custo	Referência
Fenol: 20 µg/L	<ul style="list-style-type: none"> - Vazão: 7,6 L/min -Volume do Reator: não avaliado -Fonte Luminosa: 2 lâmpadas UV de 2.5-5 KW - Comp. onda: banda larga com pico de 254 nm - Dose H_2O_2: 60 mg/L 	> 99.9	Tratamento de efluente de indústria Farmacêutica	Não Avaliado	EPA 1994
Coloração e Orgânicos Clorados: não avaliado a concentração de ambos.	<ul style="list-style-type: none"> - Vazão: 190 L/min -Volume do Reator: Não avaliado - Fonte Luminosa: 2 lâmpadas UV base de Teflon[®] - Comp. Onda: 254 nm - Dose UV: 80 mW/cm².s -Dose H_2O_2: 840 mg/L - pH: 10 -11 	Cor: 80 Orgânicos Clorados: não avaliado		Não Avaliado	Smith e Frailey 1990
<i>Salmonella</i> : 1 milhão CFU/mL	<ul style="list-style-type: none"> - Vazão: 3,8 L/min -Volume do Reator: não avaliado -Fonte Luminosa: 2 lâmpadas UV de 2.5-5 KW - Comp. onda: banda larga com pico de 254 nm - Dose H_2O_2: 80 mg/L 	> 99.9	Tratamento do Efluente de indústria avícola	Não Avaliado	EPA 1994

INCE e TEZCANLI (1999) estudaram vários processos oxidativos avançados para a degradação de um corante reativo (Procion Red HE7B). A remoção de cor para o sistema $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ foi de 90% utilizando-se um reator com 04 lâmpadas de 15 W.

ARAÚJO (2002) estudou vários processos oxidativos avançados para a degradação do corante reativo 19. Tendo remoção de DQO no sistema $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ de 85,9%, utilizando um reator com lâmpada de 65 W.

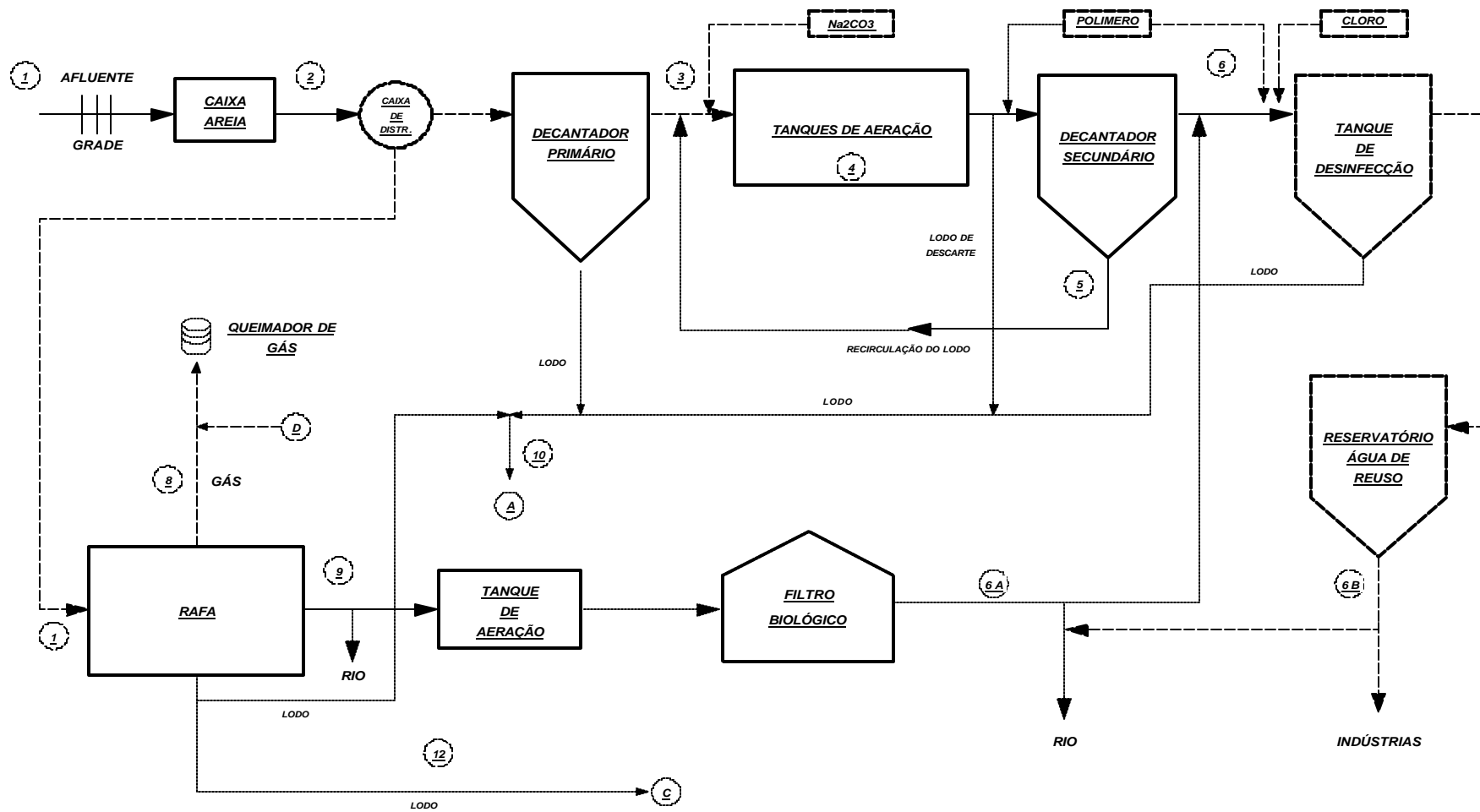
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização do experimento

O experimento foi realizado na Estação de Tratamento de Esgoto Jesus Neto da SABESP, situada na Rua do Manifesto 1255, Ipiranga, São Paulo, que teve sua inauguração no ano de 1935, a qual recebeu o nome de Estação Experimental do Ipiranga, passando mais tarde para Estação Escola de Tratamento de Esgoto Engenheiro João Pedro de Jesus Neto, conhecida mais como Estação de Tratamento de Esgoto Jesus Neto.

Instalada em uma área de 8.260 m², à margem esquerda do Rio Tamanduateí, recebe parte dos esgotos domésticos do bairro do Ipiranga, e tem capacidade total de tratamento de aproximadamente 90 L/s. Na figura 4.1 é apresentado o fluxograma simplificado da estação.

ETE JESUS NETTO - FLUXOGRAMA DE PROCESSO E PONTOS DE COLETA (FASE LÍQUIDA)



FLUXO.3/ETE J.NETO
ELAB. MÁRCIO A. SILVA

Figura 4.1: Fluxograma da ETE Jesus Neto

O processo de Lodos Ativados tem capacidade para tratar até 25 L/s usando um sistema de aeração por ar difuso. Este processo está constituído por um decantador primário retangular (volume = 217 m^3) com remoção mecanizada do lodo; três tanques de aeração retangulares (volume unitário = 209 m^3), cada tanque contendo no fundo 210 difusores porosos; um decantador secundário retangular (volume = 253 m^3), também, com remoção mecanizada de lodo; elevatória de retorno do lodo com duas bombas de capacidade individual a 12 L/s; dois sopradores rotativos com capacidade individual de 900 m^3 de ar por hora completam o sistema. As figuras 4.2 e 4.3 ilustram o sistema de lodos ativados da ETE.



Figura 4.2: Vista dos Tanques de Aeração da ETE



Figura 4.3: Vista do Decantador Secundário

No ano de 1999 implantou-se o processo de reuso de efluentes domésticos para fins industriais não potáveis, utilizando-se um processo de tratamento terciário no efluente dos lodos ativados.

Esse tratamento terciário consiste na aplicação de barrilha para ajuste do pH, Policloreto de Alumínio (PAC), como coagulante, seguido de sedimentação e aplicação de hipoclorito de sódio como oxidante, que em reação com o Nitrogênio Amoniacal presente no esgoto formam as cloraminas que promovem a desinfecção, perfazendo um tempo de retenção de aproximadamente 04 horas.

Essa água de reuso foi oferecida aos clientes potenciais, sendo que um deles, a COATS CORRENTE, interessou-se e firmou contrato com a SABESP para recebimento dessa água de reuso, que teve seus padrões de qualidade de uma forma que atendesse suas necessidades de consumo e os aspectos sanitários. Foram feitas tubulações, evidentemente que diferenciadas daquelas utilizadas para transporte de água potável, e instalada uma bomba para recalque até a indústria.

A água de reuso passou a ter tarifa de R\$ 0,46/m³, e a estação teve receita própria para investir em melhorias. Para efeito de comparação a tarifa de água potável da SABESP para uso industrial é de R\$ 16,21 (0 a 10 m³).

4.2. Aparato Experimental

O aparato experimental consiste em:

- 01 reservatório de 60 litros
- 01 uma bomba centrífuga de 0,5 CV
- 01 reator anular de radiação ultravioleta da marca TROJAN Technologies Inc., modelo TrojanUVMAX F com as seguintes características: volume interno útil: 5,4 litros. A lâmpada se localiza no centro do reator e possui comprimento de onda com emissão máxima a 254 nm, potência de 102 W, potência de saída do UV de 42 W e com dosagens de 38000 µWs/cm²
- 01 rotâmetro de 10 a 70 LPM

O efluente do sistema de lodos ativados, inicialmente, era bombeado, regulando-se a vazão desejada, do reservatório para o reator, no interior do qual escoavam em fluxo ascendente e na sua saída eram colhidas as amostras para análise. Posteriormente, trabalhou-se com recirculação formando um circuito fechado, sendo as amostras coletas nos períodos estipulados. Um esquema do experimento pode ser visto na figura 4.4, e nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 são mostradas fotografias do sistema em operação.

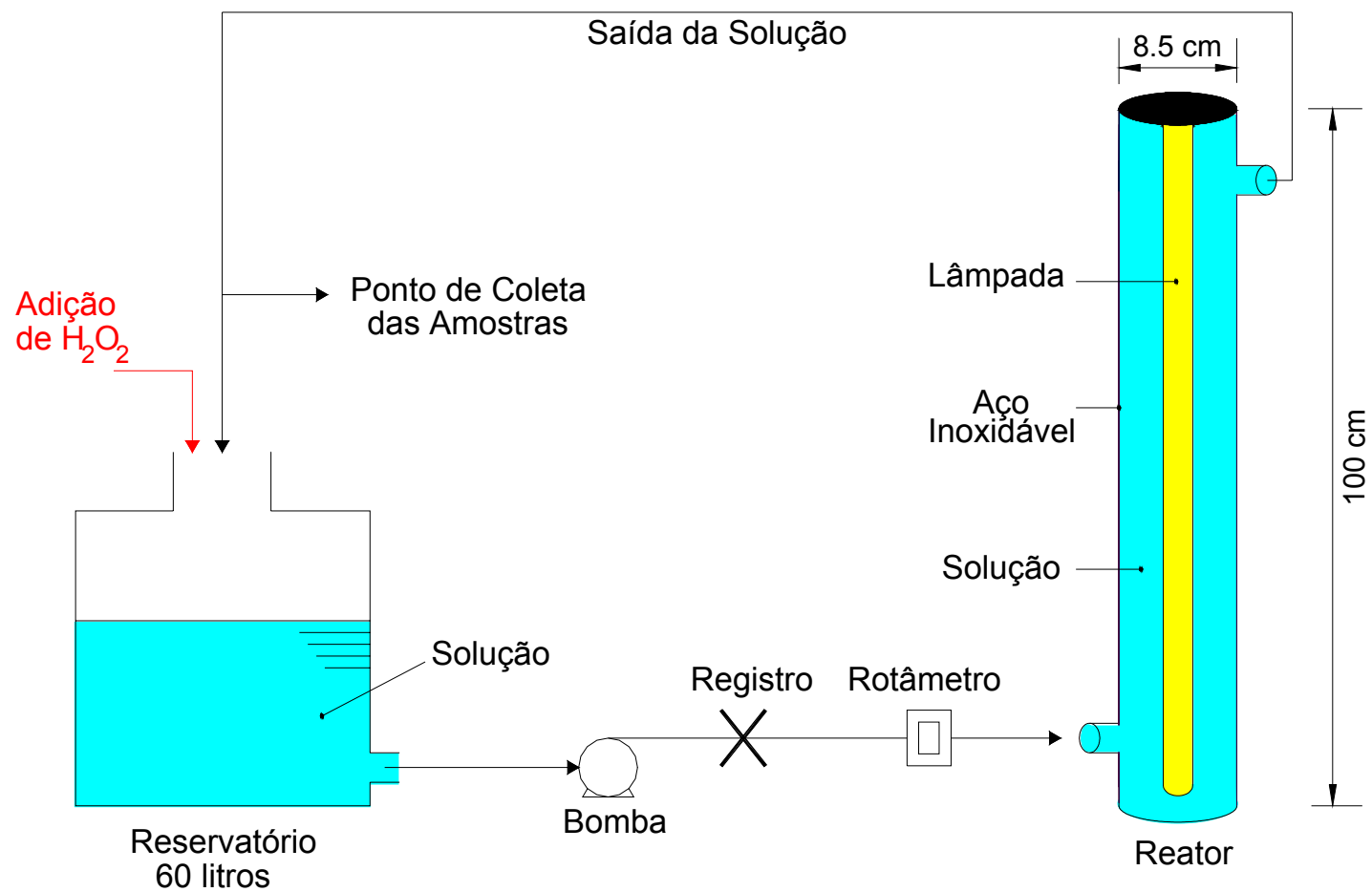


Figura 4.4: Esquema do experimento

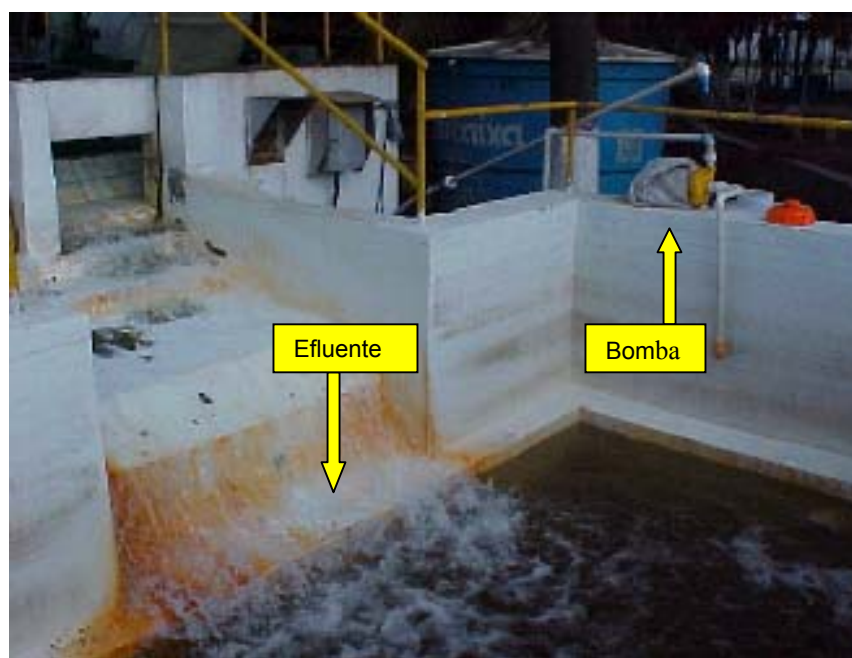


Figura 4.5: Visão do efluente do Lodos Ativados com a bomba utilizada.



Figura 4.6: Vista do reservatório de 60 L que era cheio com o efluente.

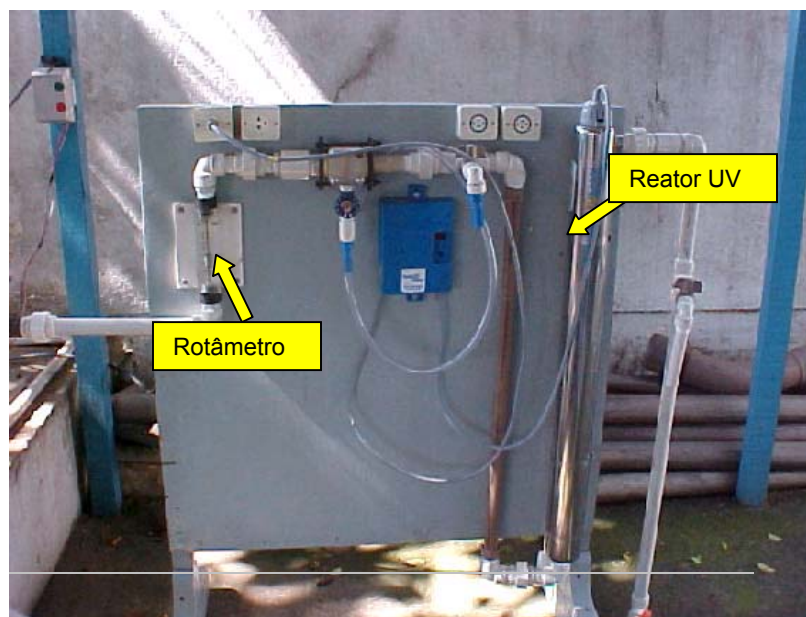


Figura 4.7: Sistema montado com o rotâmetro e reator de UV



Figura 4.8: Visão dos frascos para coleta das amostras

Os processos de tratamento foram estudados da seguinte forma:

- Fase I

Verificação, somente, da eficiência do processo H_2O_2/UV em sistema de fluxo contínuo, variando somente a vazão e, ou seja, pequeno tempo de reação.

- Fase II

Verificação, da eficiência do processo H_2O_2 , UV e H_2O_2/UV em sistema fechado, fixando-se a vazão, com diferentes tempos de reação e para diferentes concentrações de H_2O_2 .

4.3. Análises

As análises, das amostras, foram realizadas no laboratório da própria ETE, o qual é certificado pela ISO 9001: 2000, seguindo o "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20^a. Edição" (APHA-AWWA, 1998). Para a determinação de COT utilizou-se equipamento SHIMADZU 5000. Para análise de Cor Aparente utilizou-se equipamento Hach AN 2100 e comparador visual. A concentração de peróxido de hidrogênio durante o experimento foi analisada por espectrofotometria utilizando-se metavanadato de amônio (OLIVEIRA et al., 2001). As análises de Coliformes foram realizadas pela técnica da Membrana Filtrante, sendo a amostra inicial (branco) pela técnica de Tubos Múltiplos.

4.4. Reagentes

A solução estudo era proveniente do efluente do sistema de lodos ativados da ETE, não sendo a mesma a cada experimento realizado.

O reagente utilizado para o processo de tratamento foi o Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) P.A., Dinâmica, 29-32 % massa, Lote 0975.

Os reagentes utilizados para as análises foram fornecidos pelo laboratório da ETE, conforme o Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20^a. Edição” .(APHA-AWWA, 1998), sendo todos de pureza condizente com a exigência da análise.

4.5. Métodos

O processo de tratamento foi estudado das seguintes formas:

- **Fase I**

O efluente era colocado no reservatório e ligava-se a bomba para passagem da solução pelo reator. Uma amostra era coletada e chamada de branco. Posteriormente, adicionava-se uma quantidade de H_2O_2 para atingir a concentração de 40 e 70 mg/L. Em seguida, ajustava-se a vazão em 20, 50 e 70 L/min, por meio do rotâmetro. Então ligava-se o reator e eram coletadas 03 amostras, para cada vazão, com intervalos de 01 a 03 minutos cada, sendo enviadas imediatamente para análises.

O tempo de reação, ou seja, de exposição a luz ultravioleta dentro do reator, foi calculado conforme a equação 3.9:

$$tr = (Vr / Q) \times 60 \quad (3.9)$$

Sendo que, tr (s) é o tempo de reação, Vr (L) é o volume útil do reator e Q (L/min) é a vazão utilizada.

- **Fase II**

O efluente era colocado no reservatório, 30 e 60 litros, e ligava-se a bomba para passagem da solução pelo reator. Uma amostra era coletada e chamada de branco. Em seguida, fixava-se a vazão em 30 L/min por meio do rotâmetro. Posteriormente, adicionava-se uma quantidade de H_2O_2 para atingir a concentração de 40 e 20 mg/L, respectivamente. Então se realizava a recirculação da amostra durante 04 horas e coletava-se amostras a cada 01 hora, sendo enviadas imediatamente para análises. O tempo de recirculação para o experimento foi estipulado baseado em outros trabalhos (INCE e TEZCANLI, 1999; PÉREZ et al., 2001 e MARTÍN et al., 2001).

O tempo de reação, ou seja, de exposição a luz ultravioleta dentro do reator, foi calculado conforme a equação 4.0:

$$tr = trec \times Vr / Vtot \quad (4.0)$$

Sendo que, tr (min) corresponde ao tempo de reação, $trec$ ao tempo de recirculação (min), Vr (L) ao volume útil do reator, e $Vtot$ (L) ao volume total da solução.

Na tabela 4.1 são mostrados, de forma resumida, todos os experimentos realizados nas duas fases experimentais, onde são apresentados todos os parâmetros e valores dos mesmos. Mais detalhes sobre outros parâmetros serão devidamente apresentados e discutidos na parte de resultados e discussão.

TABELA 4.1: Resumo dos experimentos

	Experimento	Vazão (LPM)	Tempo Reação Total	H ₂ O ₂ (mg/L)
FASE I (Fluxo Contínuo)	1	20	16,2 s	40
		50	6,5 s	40
		70	4,6 s	40
	2	20	16,2 s	70
		50	6,5 s	70
		70	4,6 s	70
	3	70	4,6 s	0,0
		70	4,6 s	40
FASE II (Recirculação)	4	30	43,2 min	0,0
	5	30	43,2 min	40
	6	30	43,2 min	20
	7	30	43,2 min	20
	8	30	43,2 min	40
	9	30	43,2 min	40
	10	30	21,6 min	40
	11	30	21,6 min	20
	12	30	21,6 min	20

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Há interesse de outras empresas para consumir essa água de reuso com padrões de qualidade diferentes dos apresentados para esta empresa específica, principalmente em relação à cor, condutividade e organismos patogênicos. A fim de atendê-los, outros processos de tratamento terciários necessitam ser estudados para se enquadrar nos padrões estabelecidos, conforme tabela 5.0 e a uma futura legislação de água de reuso. Pois observa-se, nas figuras 9.1 a 9.9 do anexo I, que durante esses anos de operação do sistema para obtenção da água para reuso teve-se muitas oscilações na qualidade final, o que não foi possível sanar com os processos atuais de tratamento terciário, mesmo para atender a COATS CORRENTE. Outro ponto a destacar é a geração de lodo na etapa de sedimentação, que resulta somente na mudança da fase líquida para sólida, ou seja, não há degradação dos compostos.

A SABESP vem ao longo desses anos realizando estudos para a melhora na eficiência da ETE Jesus Neto. Vários projetos tem sido elaborados para uma melhor eficiência no tratamento terciário, desde o uso de flotação até uso de membrana filtrante, portanto, este trabalho está coerente com o objetivo de trazer novas alternativas para o tratamento terciário da ETE.

A opção em escolher o processo H_2O_2/UV , foi por ser dentre os tipos de POA o que seria de mais fácil operação e menor adição de substâncias químicas. Como exemplo, pode-se verificar que no processo foto-fenton tem-se de abaixar o valor do pH para aproximadamente 3,0, logo seria inadequado para o reuso. Quanto a utilização de dióxido de Titânio assistido por radiação UV, a tecnologia de aplicação e aderência do dióxido de titânio na parede do reator ainda é complexa.

TABELA 5.0: Parâmetros de Qualidade média do período 2000-2002

Parâmetro	Unidade	Afluente da ETE	Efluente L.A.	Reuso	Padrão *
Cor Aparente	UC		32	16	< 10
Turbidez	NTU		8	1,73	< 2,0
pH		6,9	6,8	6,9	> 6,0 < 8,0
Condutividade	µS/cm	495	376	423	< 400
SDT	mg/L	490	378	437	
DQO	mg/L O ₂	345	34	23	< 20
DBO	mg/L O ₂	160	13		
COT	mg/L C	42	5,83	5,10	< 6
Cloro total	mg/L Cl			7,0	1,5
Coliformes totais	/ 100 mL	$8,0 \times 10^7$	$8,0 \times 10^5$	< 1	Ausência
Coliformes fecais	/ 100 mL	$5,5 \times 10^6$	$3,2 \times 10^5$	< 1	Ausência
Transmitância a 254 nm	%		75,87		

Fonte: Relatório Gerencial MCEC – SABESP

* Padrão que foi estabelecido para atender as indústrias da região

5.1. Resultados da Fase I

Procedeu-se conforme descrito no item 4.5, sendo adicionado H_2O_2 , no efluente, para obter-se uma concentração final de 40 mg/L.

Na tabela 5.1 são demonstrados os resultado obtidos de vários parâmetros.

Tabela 5.1: Resultados do Experimento 1: concentração de 40 mg/L H_2O_2

Parametros	Unidade	Amostras								
		Branco	1	2	3	4	5	6	7	8
Vazão	LPM		20	20	20	50	50	50	70	70
Tempo de Reação	s	0,0	16,2	16,2	16,2	6,5	6,5	6,5	4,6	4,6
Horário da Coleta	h	11:05	11:11	11:13	11:15	11:34	11:36	11:38	11:43	11:45
COR	UC	105	92	109	113	110	111	109	116	116
Turbidez	NTU	7,42	7,38	7,42	8,54	7,53	8,24	8,13	7,77	8,53
COT	mg/L	19,23	19,99	20,19	20,70	19,66	19,95	19,54	19,78	19,95
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	433	432	433	433	434	434	434	433	436
DQO	mg/L	57,05	56,09	56,09	55,13	52,25	49,86	53,69	56,57	47,94
pH		6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
SST	mg/L	28	27	40	25	26	26	26	24	20
SDT	mg/L	431	431	431	431	431	430	431	430	432
Coliformes Totais	NMP/100mL	170×10^4	230	NA	NA	230	NA	NA	230	NA
Coliformes Fecais	NMP/100mL	170×10^3	< 2	NA	NA	< 2	NA	NA	< 2	NA

Nota: NA = Não Analisado

Nota-se que não houve redução da concentração nos valores da maioria dos parâmetros, a não ser a colimetria, em relação ao branco. Isto poderia ter sido causado por dois principais motivos, devido ao pequeno tempo de reação, que é o mais provável, ou devido a baixa concentração de H_2O_2 .

Quanto a colimetria houve uma eficiência de remoção de 3 Log, ou seja, 99,9% para coliformes totais.

Então novo experimento foi realizado atingindo-se uma concentração de 70 mg/L de H_2O_2 . Na tabela 5.2 pode-se verificar os resultados obtidos.

Tabela 5.2: Resultados do Experimento 2: concentração de 70 mg/L H_2O_2

Parametros	Unidade	Amostras									
		Branco	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão	LPM		20	20	20	50	50	50	70	70	70
Tempo de Reação	s	0,0	16,2	16,2	16,2	6,5	6,5	6,5	4,6	4,6	4,6
Horário da Coleta	h	10:39	11:14	11:06	11:04	11:00	10:59	10:57	10:55	10:51	10:47
COR	UC	50	62	57	*	56	56	65	49	53	54
Turbidez	NTU	3,95	3,25	3,66	*	3,90	3,65	3,20	2,99	2,51	4,82
COT	mg/L	8,46	10,47	10,17	*	9,38	26,99	24,69	9,13	9,42	23,53
Condutividade	$\mu S/cm^{-1}$	385	392	391	*	381	395	398	396	397	397
DQO	mg/L	43,70	36,44	42,84	*	46,77	34,47	36,44	37,42	36,45	38,9
pH		7,4	7,4	7,4	*	7,5	7,3	7,3	7,4	7,4	7,4
SST	mg/L	10	11	12	*	13	10	11	12	10	13
SDT	mg/L	437	437	437	*	441	439	442	441	439	441
Coliformes Totais	NMP/100mL	$70 \cdot 10^4$	30	NA	NA	50	NA	NA	30	NA	NA
Coliformes Fecais	NMP/100mL	$50 \cdot 10^3$	23	NA	NA	23	NA	NA	30	NA	NA

Nota: Amostra 3 (*) sem resultados devido problema de transporte da amostra.

NA = Não Analisado

Houve uma eficiência de remoção de 4 Log, ou seja, 99,99% para a variável coliforme totais. Verifica-se que houve um aumento da eficiência quando comparado ao experimento 1, devido ao aumento da quantidade de H_2O_2 adicionada e pela quantidade inicial de coliformes ser menor que no primeiro experimento.

Com relação aos outros parâmetros, novamente não houve remoção. Também visualmente não houve alteração do aspecto do efluente após passar pelo tratamento. Levando-se a concluir que o tempo de reação não estava sendo suficiente. Portanto verificou-se a necessidade de passar a trabalhar com recirculação.

Alguns resultados de COT das amostras 5, 6 e 9 apresentaram-se divergentes das demais amostras. Isto pode ter ocorrido devido a problema na coleta ou análise e também por não haver agitação no reservatório.

Antes de realizar a Fase II, realizou-se o experimento 3 para comparar a eficiência somente do processo UV em relação ao UV/ H₂O₂, principalmente, na remoção de coliformes. Logo, fixou-se uma só vazão e adicionou-se o H₂O₂ no efluente somente a partir da amostra 3. Na tabela 5.3 pode-se verificar os resultados obtidos.

Tabela 5.3: Resultados do Experimento 3: concentração de 40 mg/L H₂O₂

Parametros	Unidade	Amostras				
		Branco	1 UV	2 UV	3 UV/ H ₂ O ₂	4 UV/ H ₂ O ₂
Vazão	LPM		70	70	70	70
Tempo de Reação	s	0,0	4,6	4,6	4,6	4,6
Horário da Coleta	h	10:31	10:39	10:42	10:47	10:57
COR	UC	53	62	66	56	86
Turbidez	NTU	3,25	3,44	3,50	3,18	3,16
COT	mg/L	6,37	6,72	6,56	6,43	6,30
Condutividade	µS/cm ⁻¹	400	399	398	400	399
DQO	mg/L	43,7	29,6	28,67	50,28	60,15
pH		7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
SST	mg/L	12,5	15,5	17	13,5	13,5
SDT	mg/L	453	453	452	453	453
Coliformes Totais	NMP/100mL	50*10 ³	23	30	< 1,1	< 1,1
Coliformes Fecais	NMP/100mL	8*10 ³	13	23	NA	NA

Nota: NA = Não Analisado

Verifica-se que não houve redução dos parâmetros por parte de nenhum processo. Quanto a remoção de coliformes para o processo UV houve uma remoção de 3 log (99,94%) e para o processo UV/ H₂O₂ constatou-se a obtenção de ausência de coliformes.

Quanto a análise de DQO, observou-se um aumento do valor após a adição de H₂O₂. Certamente essa variação nos valores desse parâmetro foi devido a presença de resíduos do oxidante não consumido nos ensaios, provocando uma interferência na análise. Resíduos de peróxido, quando em altas concentrações, devem ser eliminados da solução, por exemplo, com enzima específica, ou seja peroxidase.

Observa-se que quanto menor a concentração de coliformes no efluente, maior a eficiência de remoção.

5.2. Resultados da Fase II

Para esses experimentos, procedeu-se conforme item 4.5, e como a faixa de operação do rotâmetro variava de 10 a 70 LPM, fixou-se a vazão em 30 LPM a ser utilizada.

Partindo do experimento 3 da fase anterior e como teria um aumento no tempo de reação, as análises de coliformes passaram a ser feitas por meio da técnica de membrana filtrante, sendo utilizada a técnica de tubos múltiplos somente para a amostra inicial (branco).

Foi realizado um estudo para verificar as eficiências dos processos separadamente.

5.2.1. Processo UV

Foi realizado o experimento submetendo o efluente somente a radiação ultravioleta. Na tabela 5.4 são demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 5.4: Resultados do Experimento 4: 30 L, vazão 30 LPM.

		Amostras				
Parâmetros	Unidade	Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4	43,2
COR	UC	20	20	20	20	20
Turbidez	NTU	5,50	5,84	5,36	5,97	5,77
COT	mg/L	6,94	8,24	8,15	8,16	8,40
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	378	399	397	399	398
pH		6,62	7,46	7,63	7,84	7,95
SDT	mg/L	151	178	180	179	182
Coliformes Totais	NCMF/ 100 mL	NA	< 1	< 1	< 1	< 1

Nota: NA = Não Analisado

Conforme esperado para a colimetria, para monitoração da concentração das bactérias foi utilizada a técnica de membrana filtrante, obtendo-se ausência de coliformes.

Nota-se que não houve remoção para os demais parâmetros, conforme era esperado. ARAÚJO (2002) também verificou um efeito insignificante na descoloração do corante azul reativo 19, em ensaios realizados em condições semelhantes.

5.2.2. – Processo H₂O₂

Estudou-se o efeito do H₂O₂, adicionado até atingir a concentração de 40 mg/L, sobre o efluente. Na tabela 5.5 são demonstrados os resultados obtidos.

Tabela 5.5: Resultados do Experimento 5: 30 L, vazão 30 LPM.

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4	43,2
COR	UC	20	20	20	20	20
Turbidez	NTU	3,58	3,80	3,96	4,29	4,43
ORP	mV	195	225,4	225,5	241,5	232,6
COT	mg/L	6,09	5,65	5,97	6,74	6,09
Condutividade	µS/cm ⁻¹	344	342	342	343	343
pH		6,24	7,25	7,36	7,34	7,39
SDT	mg/L	139	133	134	132	133
Coliformes Totais	NCMF / 100 mL	NA	*	51	34	9

Nota: NA = Não Analisado

* houve o crescimento confluyente na placa

Houve inativação para a colimetria, levando-se em conta a média do valor encontrado no efluente, pois não foi realizada a análise da amostra branco bem como de coliformes fecais.

Nota-se que não houve remoção para os demais parâmetros, conforme era esperado. Quanto a análise de ORP, verificou-se uma estabilidade dos valores o que leva-se a pensar que não ocorreram reações significativas.

ORP é a sigla de Oxidation Reduction Potential (Potencial de Oxidação e Redução), também conhecido como RedOx. Medir o ORP é uma forma de controlar as reações químicas que ocorrem em um determinado meio, através do equilíbrio entre as reações de oxidação (perda de elétrons) e redução (ganho de elétrons).

ARAÚJO (2002) também verificou um efeito insignificante da ação do H_2O_2 para degradação de corante azul R-19, em condições semelhantes de ensaio.

5.2.3. – Processo H_2O_2 /UV

Houve a preocupação nesta fase de procurar atingir os padrões estabelecidos buscando o menor tempo de reação possível, pois isto leva a uma economia de energia e com a menor concentração de H_2O_2 , para evitar desperdício. Inclusive, como já descrito anteriormente, altas concentrações do oxidante H_2O_2 , não significa um elevado rendimento na reação, pois com o seu excesso ocorrem reações competitivas retardando a degradação. (DOMÈNECH, JARDIM, LITTER, 2001).

Nas tabelas 5.6 e 5.7 são demonstrados os resultados obtidos em experiências realizadas em dias diferentes, no entanto, nas mesmas condições de concentração de reagente e vazão.

Tabela 5.6: Resultados do Experimento 6: 30 L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4	43,2
COR	UC	58	54	53	54	46
Turbidez	NTU	6,40	8,22	9,92	9,86	7,61
COT	mg/L	7,85	8,96	7,96	8,66	8,30
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	413	393	390	388	385
H_2O_2	mg/L	0,0	18,5	15,0	9,5	4,0
pH		7,11	7,6	7,7	7,9	8,1
ORP	mv	190	221	203	201	188
SDT	mg/L	410	411	412	410	405
Coliformes Totais	/ 100 mL	$170 \cdot 10^4$	*	15	2	1
Coliformes Fecais	/ 100 mL	$14 \cdot 10^4$	< 1	< 1	< 1	< 1

Tabela 5.7: Resultados do Experimento 7: 30 L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4	43,2
COR	UC	38	46	44	48	51
Turbidez	NTU	4,54	5,49	5,10	5,05	5,32
COT	mg/L	5,77	6,66	5,96	6,08	6,40
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	318	318	309	310	313
H_2O_2	mg/L	0,0	5,5	3,5	2,5	2,5
pH		7,15	7,75	7,88	7,90	8,12
ORP	mv	190	184	196	182	200
SDT	mg/L	327	318	309	310	313
Coliformes Totais	/ 100 mL	$80 \cdot 10^3$	*	46	20	4
Coliformes Fecais	/ 100 mL	$17 \cdot 10^3$	*	< 1	< 1	< 1

Em relação à monitoração de bactérias, na amostra 1 (*) houve o crescimento confluyente na placa nos dois experimentos, não sendo possível sua exata quantificação. Obteve-se uma remoção de 3 log (99,9%) para coliformes totais e verificou-se uma ausência de coliformes fecais (abaixo do limite de detecção, ou seja, 1 org. / 100 mL).

Com relação aos outros parâmetros, nos dois experimentos, não houve redução dos valores em relação ao branco, mesmo com o aumento do tempo de reação. Também visualmente não houve alteração do aspecto do efluente após passar pelo tratamento, mantendo uma coloração marrom.

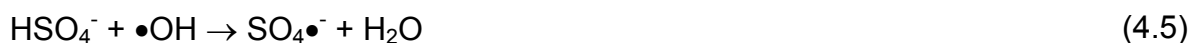
A análise de ORP demonstrou uma estabilidade dos valores, o que se leva a pensar que pode ter ocorrido a formação de radicais hidroxila, no entanto essa espécie altamente oxidante foi consumida pela matéria orgânica, porém a mesma não foi mineralizada a CO_2 e H_2O .

Porém, observa-se que houve o consumo de H_2O_2 , em ambos os ensaios, o que pode ter ocorrido pela reação direta do peróxido de hidrogênio com a matéria orgânica, sem a formação de radicais hidroxila, sendo a atuação dos mesmos prejudicada por algum fator .

Uma das possibilidades pode ser devido a estabilidade do peróxido de hidrogênio, pois conforme a US Peroxide (2001-2003) a maioria dos H_2O_2 comercializados possuem quelantes ou sequestrantes, principalmente a base de fosfato, que minimizam a decomposição do produto, ou seja, são compostos estabilizantes do peróxido de hidrogênio.

Logo, para os próximos experimentos, diluiu-se o H_2O_2 a 10% (10 % de H_2O_2 e 90% água), antes de adicionar na amostra, numa tentativa de desestabilizá-lo, para ocorrer a reação desejada.

Outro possível fator seria a adição de barrilha que era feita para correção de pH no efluente para o tratamento terciário da ETE. Conforme a EPA (1998) os íons de carbonato e bicarbonato são conhecidos seqüestradores de $\bullet\text{OH}$, provocando uma diminuição da eficiência do sistema. Segundo GALINDO (2001), a presença de certos íons, tais como carbonatos e ânions de ácidos utilizados para acidificar efluentes, prejudica a atuação do radical hidroxila na oxidação de compostos poluentes, devido a reação entre os radicais hidroxila e estes íons, como pode ser visto nas equações abaixo:



Logo, solicitou-se aos operadores da ETE, que nos dias de realização dos experimentos não fosse adicionado barrilha no efluente.

Devido a recirculação houve aumento da temperatura da solução, logo há necessidade de verificar a temperatura.

Nas tabelas 5.8 e 5.9 são demonstrados os resultados obtidos, após as correções descritas, no entanto, com a duplicação da concentração, inicial de peróxido de hidrogênio.

Tabela 5.8: Resultados do Experimento 8: 30 L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras			
		Branco	1	2	3
Vazão	LPM		30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4
Temperatura	°C	26,5	33,5	36,5	37,5
COR	UC	20	10	5	5
Turbidez	NTU	3,01	2,05	1,75	1,63
COT	mg/L	4,81	3,69	3,42	3,10
DQO	mg/L	14,0	11,7	8,0	5,8
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	368	337	342	342
H_2O_2	mg/L	0,0	8	4,4	1,4
pH		6,8	7,4	7,9	8,0
ORP	mv	198,3	237	194	190
SDT	mg/L	146	143	144	144
Coliformes Totais	/ 100 mL	NA	< 1	< 1	< 1

Nota: NA = Não Analisado

Tabela 5.9: Resultados do Experimento 9: 30 L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	10,8	21,6	32,4	43,2
Temperatura	°C	25,3	30	34	35	37,5
COR	UC	26	13	11	14	12
Turbidez	NTU	2,74	2,64	2,25	2,23	1,90
COT	mg/L	4,64	4,01	3,69	3,46	3,45
DQO	mg/L	17,7	15,4	10,7	10,0	7,0
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	365	352	353	353	353
H_2O_2	mg/L	0,0	8,3	3,7	2	1,2
pH		7,2	7,7	7,7	8,1	8,1
ORP	mv	174,2	192,5	191,1	181,1	178,9
SDT	mg/L	148	147	147	147	147
Coliformes Totais	/ 100 mL	NA	< 1	< 1	< 1	< 1

Nota: NA = Não Analisado

Conforme pode ser observado, houve a inativação de coliformes e uma redução nos valores em relação ao branco de Cor, Turbidez, DQO e COT analisados nos dois experimentos, a não ser a condutividade que se manteve praticamente no valor inicial. A estabilidade desse último parâmetro está coerente com os objetivos do trabalho, pois com a adição de produtos químicos em tratamentos terciários geralmente provoca um aumento na quantidade de íons na solução, o que pode inviabilizar o uso da água de reuso para algumas indústrias, também poderia haver um aumento da quantidade de íons em solução, provocada pela própria mineralização da matéria orgânica pelo oxidante.

Visualmente também houve alteração do aspecto do efluente, de marrom para transparente e não houve formação de nenhum resíduo sólido (lodo) dentro do reservatório. Houve uma alta eficiência na inativação de coliformes, com apenas uma hora de recirculação.

Como as soluções estudadas são diferentes do ponto de vista dos valores iniciais, pois os testes foram realizados em dias diferentes, os gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 foram construídos em função da relação C/Co , ou seja, quanto ainda resta do valor do parâmetro analisado em relação a amostra inicial (branco). Sendo C a concentração do parâmetro analisado nos diversos tempos de ensaio e Co é a concentração do parâmetro da amostra branco, antes de adicionar o H_2O_2 e submeter a irradiações UV.

Logo, demonstra-se que houve a formação de radicais hidroxilas que degradaram a matéria orgânica e outros compostos. Isto pode ser verificado também pela análise de ORP, onde houve uma elevação no valor em relação ao branco atingindo um pico e voltando ao valor inicial, o que demonstra que houve a reação desejada, o que ser visto na figura 5.3.

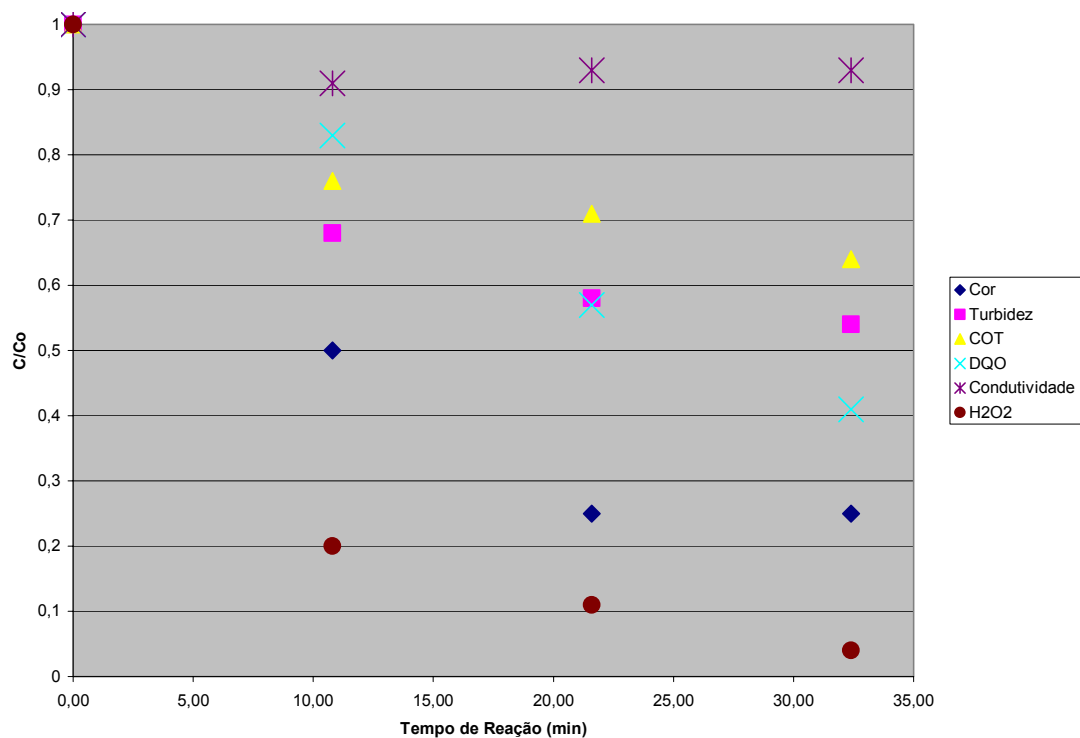


Figura 5.1: Experimento 8: 30 L solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

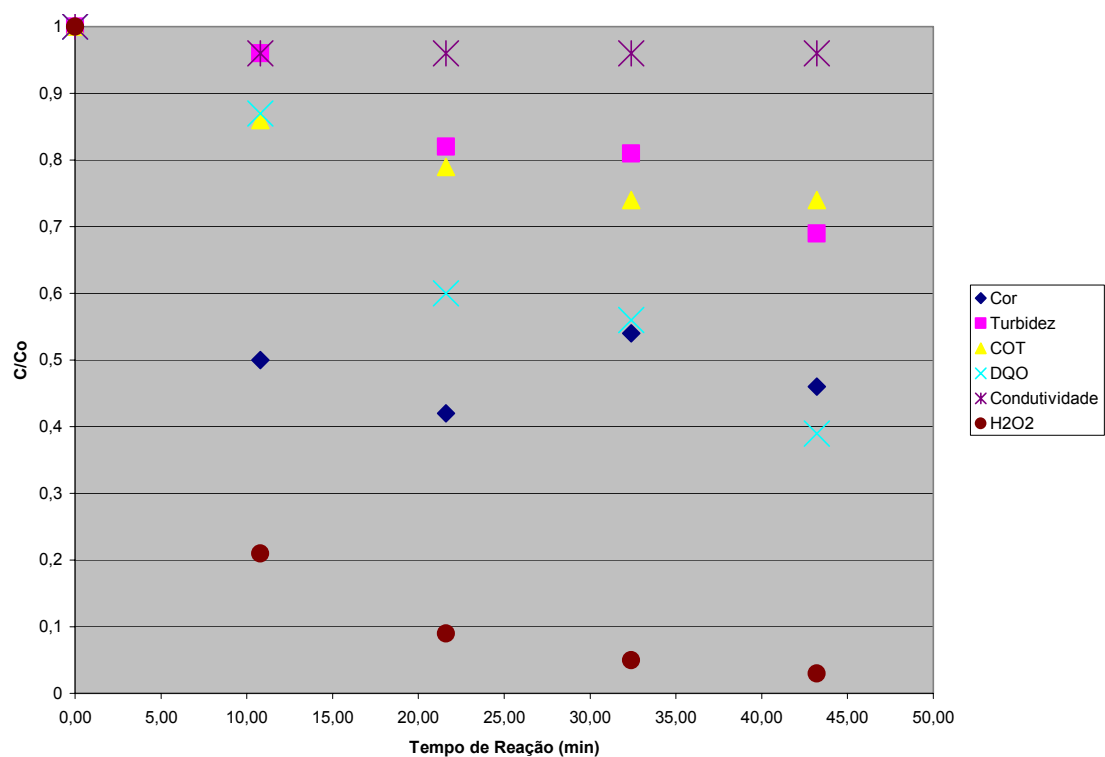


Figura 5.2: Experimento 9: 30 L solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

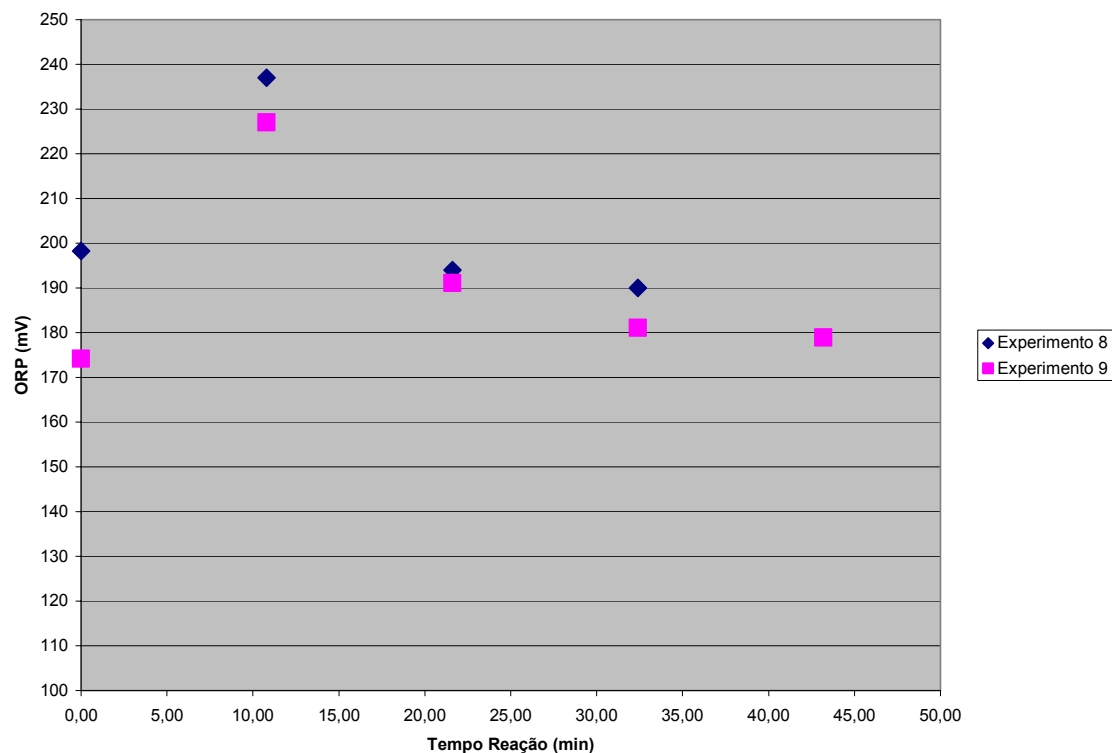


Figura 5.3: Variação do valor de ORP

Obtiveram-se os valores dos parâmetros dentro do padrão desejado, exceto pela cor no experimento 9. Com relação a essa variável, a análise correspondente ao experimento 8 foi realizada por meio de comparação visual com padrões. As análises do experimento 9 foram realizadas no equipamento Hach AN 2100, e, em verificação visual em relação a um padrão de cor de 10 UC, notou-se que os valores de Cor das amostras estavam abaixo de 10 UC o que não correspondia com o resultado obtido no equipamento. Notou-se uma interferência nas análises quando realizada no equipamento, portanto nos próximos experimentos foram realizadas as análises de Cor visualmente e com o auxílio do referido equipamento. Sendo que para os cálculos da relação C/C_0 adotou-se o valor obtido no equipamento, mas cabe ressaltar que futuramente ao definir o valor padrão de cor, para água de reuso, este deverá estar atrelado a uma metodologia específica.

A partir da confirmação de que o processo de tratamento proposto possui um alto potencial de ser aplicado no tratamento do efluente em estudo, destinado ao reuso, novos ensaios foram realizados em diferentes condições experimentais. Esses novos ensaios tiveram como objetivo definir os valores mais adequados para fins de projeto, levando em consideração: atingir o padrão desejado de cada parâmetro com o menor custo possível. Portanto, diminui-se o tempo de reação e exposição à Luz UV, ou seja, dobrando o volume de efluente utilizado, e diminui-se a quantidade de H_2O_2 , a fim de poder comparar as eficiências de remoções e adotar a mais adequada.

Os resultados encontrados podem ser verificados nas tabelas 5.10 e 5.11:

Tabela 5.10: Resultados do Experimento 10: 60 L, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	5,4	10,8	16,2	21,6
Temperatura	°C	26	26,8	30,3	32,7	34
COR (Hach)	UC	38	28	22	22	20
Cor (Visual)	UC	20	10	> 5 < 10	> 5 < 10	> 5 < 10
Turbidez	NTU	3,03	2,91	2,86	2,61	2,40
COT	mg/L	5,88	4,85	4,21	3,61	3,10
DQO	mg/L	19,6	18,4	17,2	14,0	11,2
Condutividade	$\mu S/cm^{-1}$	342	332	332	332	332
H_2O_2	mg/L	0,0	14,5	9,5	7	4,5
pH		6,34	6,82	6,92	7,03	7,05
ORP	mv	170	265	228	222	219
SDT	mg/L	137	135	136	136	136
Coliformes Totais	/ 100 mL	NA	1	< 1	< 1	< 1
Coliformes Fecais	/ 100mL	NA	1	NA	NA	NA

Nota: NA = Não Analisado

Tabela 5.11: Resultados do Experimento 11: 60 L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Amostras				
		Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM		30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h		1	2	3	4
Tempo de Reação	min	0,0	5,4	10,8	16,2	21,6
Temperatura	°C	26	32	37,5	38	39
COR (Hach)	UC	20	12	9	8	8
Cor (Visual)	UC	20	> 10 < 15	> 5 < 10	> 5 < 10	> 5 < 10
Turbidez	NTU	1,16	1,08	1,04	0,95	0,94
COT	mg/L	4,32	3,66	3,26	2,85	2,62
DQO	mg/L	13,6	13,0	8,2	7,8	7,0
Condutividade	$\mu S/cm^{-1}$	401	395	393	393	393
H_2O_2	mg/L	0,0	7,4	4,3	3,1	1,9
pH		6,7	7,2	7,3	7,3	7,3
ORP	mv	184	240	202	201	199
SDT	mg/L	137	135	136	136	136
Coliformes Totais	/ 100 mL	NA	<1	< 1	< 1	< 1

Nota: NA = Não Analisado

Nota-se que, mesmo com a redução do tempo de reação, por exemplo, no experimento 8 (Tabela 5.10), obteve-se uma redução dos valores iniciais dos parâmetros estudados, seguindo a mesma tendência verificada em outros experimentos, o que pode ser visto na figura 5.4. Logo, pelos resultados obtidos, sugere-se que o tempo de reação possa ser diminuído mantendo-se a mesma eficiência do processo.

Quanto ao experimento 11 (Tabela 5.11), observou-se que aconteceu o mesmo comportamento dos experimentos anteriores, mesmo com a redução do tempo de reação e da quantidade de H_2O_2 , o que pode ser visto na figura 5.5.

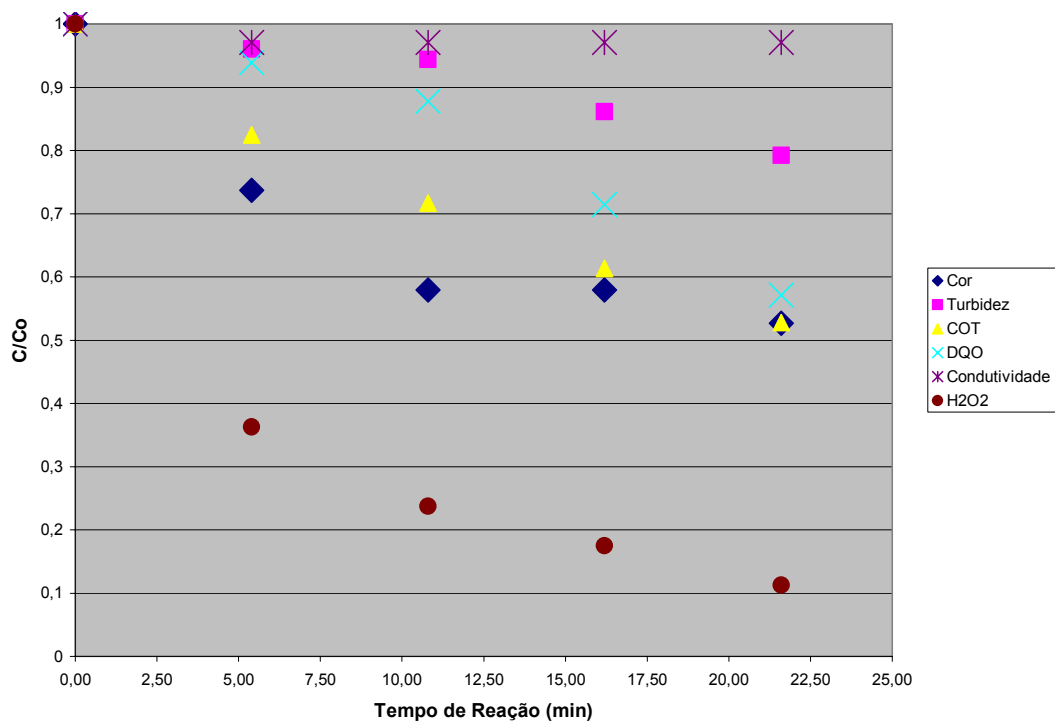


Figura 5.4: Experimento 10: 60 L solução, vazão 30 LPM, concentração de 40 mg/L H_2O_2

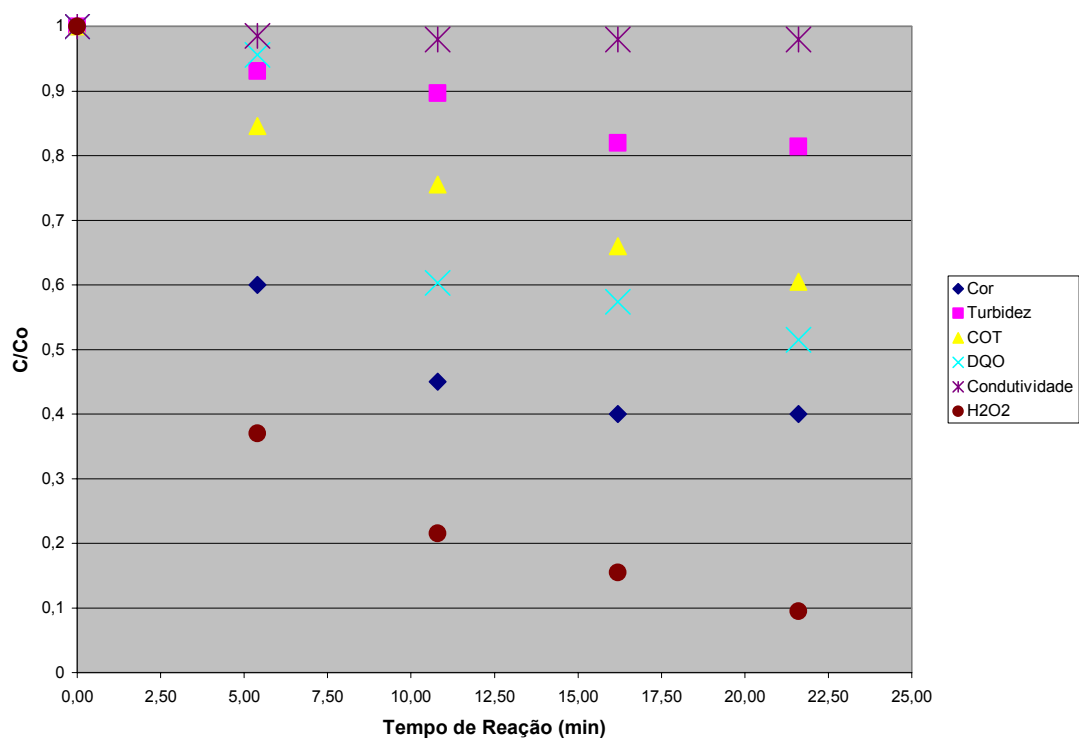


Figura 5.5: Experimento 11: 60 L solução, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Comparando os experimentos 10 e 11, pode-se observar que as relações C/Co foram praticamente iguais para ambas concentrações de H_2O_2 . Provavelmente há um excesso de H_2O_2 no meio, quando utilizado 40 mg/L, que inclusive pode prejudicar a reação, conforme descrito anteriormente. Também não foi constatada a formação de lodo no fundo do reservatório em nenhum dos dois experimentos.

Pelos resultados obtidos nas análises de ORP, observa-se um mesmo comportamento que nos experimentos anteriores, o que pode ser visto nas figuras 5.6, ou seja, nos primeiros minutos de ensaio houve uma formação de espécies muito oxidantes, e que ao longo do tempo há uma diminuição em consequência do próprio consumo do oxidante (peróxido de hidrogênio).

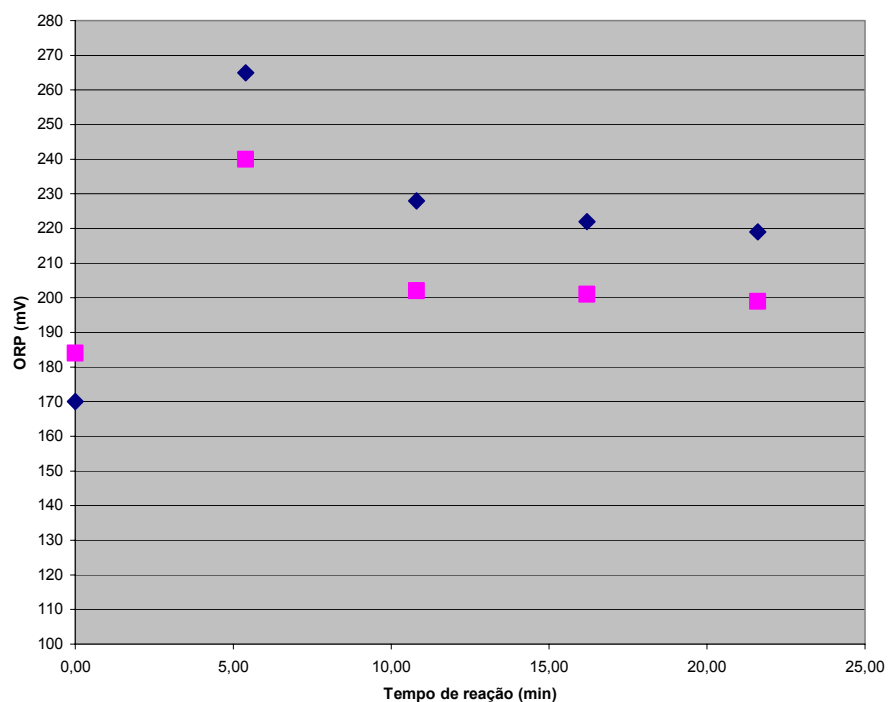


Figura 5.6: Variação do valor de ORP

A título de comparação nas figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 são mostradas o aspecto do efluente antes e depois do tratamento.



Figura 5.7: Foto do efluente dentro do reservatório antes de iniciar o processo de tratamento



Figura 5.8: Foto do efluente dentro do reservatório após 3 horas de recirculação



Figura 5.9: Foto da comparação das amostras antes e depois do tratamento

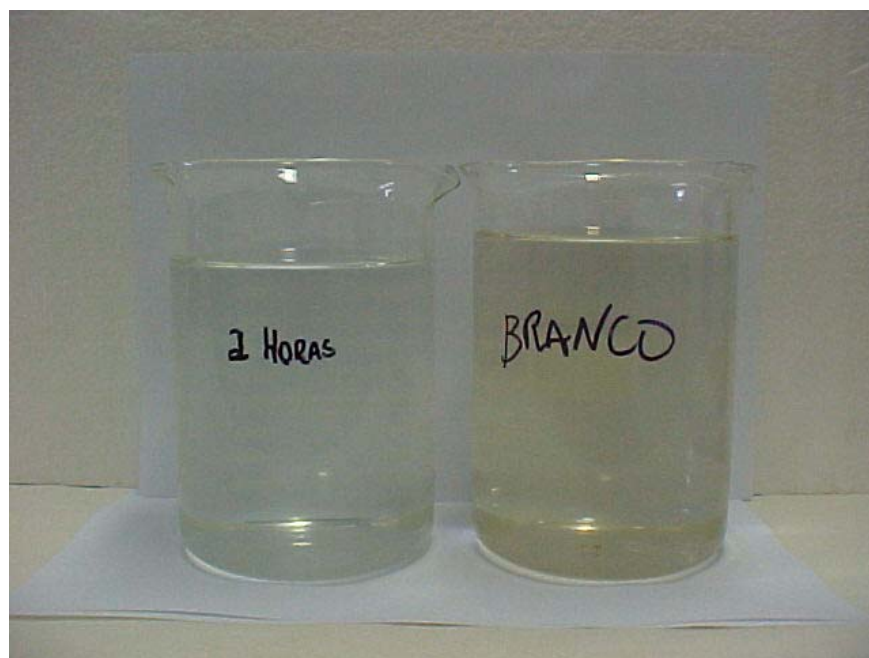


Figura 5.10: Foto da comparação das amostras antes e depois do tratamento

Como pode ser observado, visualmente houve uma eliminação da cor do efluente e não houve a formação de lodo no reservatório.

Segundo MARTÍN et al. (2001) o processo H_2O_2/UV é eficiente na remoção de cor em águas contaminadas, sendo relacionado a sua remoção com a redução do COT. Isto realmente pode ser observado, pois nos experimentos quando houve a redução de Cor também reduziu-se a concentração de COT. Demonstrando ser um processo realmente de degradação de compostos e não somente mudança de fase.

O processo mostrou-se altamente eficiente na inativação de organismos patogênicos (pelo menos 3 ordens de magnitude), o que também foi verificado por WATTS et al. (1995) que obteve resultados satisfatórios na inativação de bactérias do grupo coliforme e do vírus tipo poliovírus 1, utilizando um POA por meio de TiO_2/UV , que apesar de ser diferente do processo em estudo, também tem o mesmo princípio, ou seja, a formação de radicais hidroxilas.

Avaliando os gráficos de C/Co dos experimentos observa-se que obteve-se reduções aproximadas de:

- 50 a 60% de Cor aparente, mesmo levando-se em consideração o método de análise não corresponder com o visualizado;
- 50 a 60% de DQO
- 40% de COT
- 20 a 30% de Turbidez

Em alguns experimentos os valores de turbidez não atingiram os padrões estabelecidos, mas isso também depende da qualidade do efluente que é gerado pelo sistema de L.A. Cabe ressaltar que o valor padrão adotado, para a água de reuso, refere-se também a passagem por sistema pressurizado de filtração com areia-antracito e cartucho (10 micras) existente na ETE. Esta preocupação em relação a turbidez é devido a mesma diminuir a eficiência na desinfecção e para a retenção de possíveis protozoários. Logo o efluente sendo tratado com POA e sendo demonstrada a sua eficiência na inativação desses microorganismos, o padrão para o parâmetro turbidez poderia ser revisto para a água de reuso.

A formação de radicais hidroxila foi melhor observada pela análise de ORP, demonstrando ser uma ferramenta útil no acompanhamento de processos de tratamento utilizando-se de POA.

5.3. Estudo de degradação de compostos orgânicos específicos

Segundo HUANG et. al. (1993) os POA são processos de alta eficiência na destruição de compostos tóxicos, como por exemplo: fenóis, pesticidas. A US PEROXIDE (2001-2003) recomenda o uso do processo H_2O_2/UV para a degradação de BETX e parafinas. A utilização do POA é de significativa importância, pois a água de reuso será manipulada por seres humanos e podem ser utilizadas também com aspersão, podendo ocorrer a contaminação do ambiente pela suspensão desses compostos no ar.

O Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno e Xileno (BETX) são considerados compostos orgânicos voláteis sendo classificados como compostos carcinogênicos para os seres humanos. Tanto que a Portaria 1469 regulamenta a quantidade máxima permitida na água para consumo humano.

Para verificar a eficiência de remoção destas substâncias foi realizado um experimento, sendo adicionado em 60 litros do efluente, 1,0 mL de solução contendo 200 mg/L de Benzeno, marca Synth com 99% de pureza e 18,0 mL de solução contendo 200 mg/L de Tolueno, marca Quimex P.A. Procedeu-se seguindo o método da Fase II com uma concentração de 20 mg/L de H_2O_2 . Os resultados podem ser vistos na tabela 5.12.

Tabela 5.12: Resultados do Experimento 12: 60 L, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Parâmetros	Unidade	Valor Máximo Portaria 1469	Branco	1	2	3	4
Vazão	LPM			30	30	30	30
Tempo de Recirculação	h			1	2	3	4
Tempo de Reação	min		0,0	5,4	10,8	16,2	21,6
Benzeno	µg/L	5	2,18	0,30	< 0,130	< 0,130	< 0,130
Tolueno	µg/L	170	41,51	5,62	1,68	1,15	1,02
Etilbenzeno	µg/L	200	< 0,119	< 0,119	< 0,119	< 0,119	< 0,119
Xileno	µg/L	300	0,5	< 0,35	< 0,35	< 0,35	< 0,35
BETX Total	µg/L		44,19	5,92	1,681	1,15	1,02
H_2O_2	mg/L		0,0	9,5	9,3	8,1	7,1

Pode ser observado que houve a degradação dessas substâncias, com redução de até 97%, o que pode ser visto na figura 5.11.

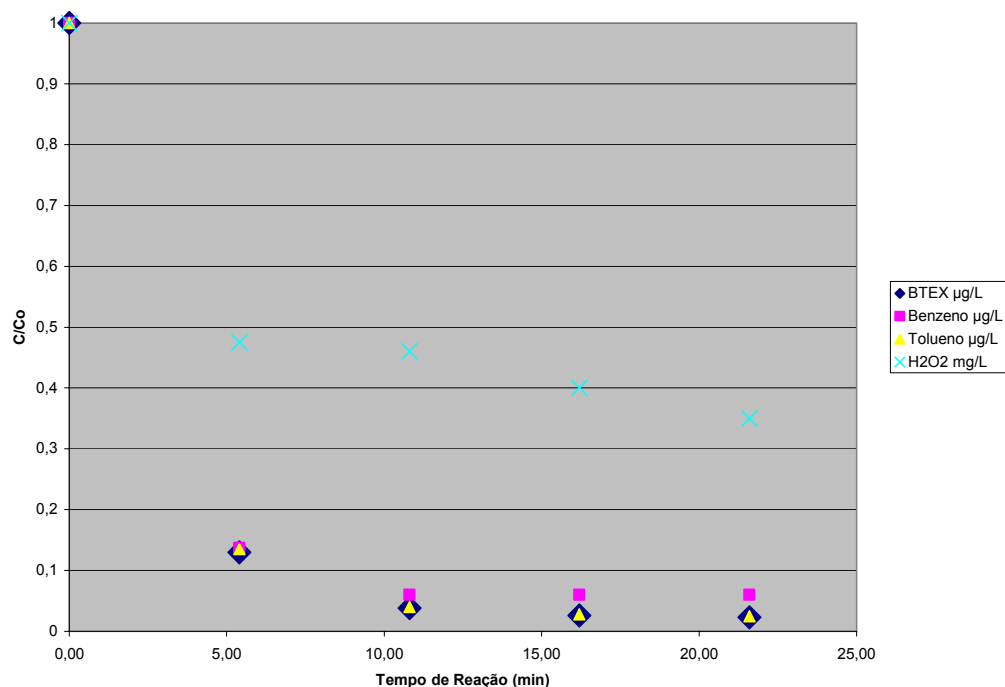


Figura 5.11: Experimento 12 : 60 L solução com adição de Benzeno e Tolueno, vazão 30 LPM, concentração de 20 mg/L H_2O_2

Estes resultados comprovam o que a US PEROXIDE (2001-2003) descreve, e são muito importantes, pois o tratamento biológico não consegue degradar esses tipos de substâncias. Logo, apesar do afluente da ETE ser de característica doméstica, podem ocorrer despejos de postos de gasolina e outras pequenas empresas que podem mudar a característica do efluente e assim teríamos como degradá-los, fornecendo uma água de reuso isenta desses compostos. Com esses resultados também pode-se levar em consideração estudos para tratamento de outros efluentes de ETE considerados de característica industrial.

Seria interessante uma avaliação mais profunda da degradação desses compostos orgânicos específicos, assim como outros que podem estar presentes no esgoto, verificando-se a formação de subprodutos e toxicidade.

5. 4. – Cálculos para fins de Projeto.

Tem-se os valores teóricos calculados para o tratamento dos 25 L/s, ou 64800 m³/mês, do efluente gerado no sistema de L.A. da ETE.

5.4.1. - H₂O₂

Conforme verificado nos resultados dos ensaios nos quais foram utilizados o processo H₂O₂/UV, e visando custos-benefícios, a concentração de Peróxido de Hidrogênio adotada para fins de projeto poderia ser de 20 mg/L.

Logo, aplicando a equação $C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$ (4.7)

Sendo,

C₁ é a concentração final desejada

V₁ é o volume final desejado

C₂ é a concentração da solução de H₂O₂ (a 50%)

V₂ é o volume da solução H₂O₂ (a 50%) a ser adicionada

Tem-se a quantidade de H₂O₂ (a 50%) ser adicionada para o tratamento:

$$20 \text{ mg/L} \times 25 \text{ L/s} = 500000 \text{ mg/L} \times V_2$$

$$V_2 = 1,00 \text{ mL/s}$$

Mensalmente haverá um gasto de = $(1,00 \text{ mL/s} \times 3600 \text{ h/s} \times 24 \times 30) / 1000$
2592 L/ mês de H_2O_2 (a 50%)

Sendo a densidade do H_2O_2 (a 50%) igual a 1,18 kg/L, temos:

Consumo mensal de H_2O_2 (a 50%) será de 3058,56 kg/ mês

5.4.2. – UV

Conforme verificado nos resultados não houve diferença das taxas C/Co em relação a diminuição do tempo de reação, e observa-se que após 02 horas de recirculação não há uma redução significativa, logo o tempo de reação adotado para fins de projeto seria 10,8 minutos. Para efeito de projeto é necessário o cálculo da dosagem de UV aplicada, segundo EPA (1986):

$$\text{Dose} = I \times t_r, \text{ expressa em } \mu\text{Ws/cm}^2 \quad (4.8)$$

Sendo: I a intensidade média aplicada, expressa em $\mu\text{W/cm}^2$
 t_r o tempo de exposição a radiação UV, expressa em s

Dos dados do fornecedor, item 4.2, temos que a Dosagem desse reator utilizado é de 38000 $\mu\text{Ws/cm}^2$.

Sendo o volume útil do reator de 5,4 L, calcula-se o t_r para uma vazão de 30 LPM, que foi utilizada nos experimentos, conforme a equação 3.9:

$$t_r = V_r / Q = (5,4 \text{ L} / 30 \text{ LPM}) \times 60$$
$$t_r = 10,8 \text{ s}$$

Utilizando a equação 4.2, temos a intensidade média do reator:

$$I = \text{Dose} / t_r$$
$$I = 38000 / 10,8 = 3519 \text{ } \mu\text{W}/\text{cm}^2$$

Esse valor de I será utilizado para o cálculo da Dosagem total aplicada no experimento.

Sendo adotadas 2 horas de recirculação, $t_r = 10,8 \text{ min}$, pela equação 4.8, temos:

$$\text{Dosagem total} = I \times t_r$$

$$\text{Dosagem total} = 3519 \times 10,8 \times 60 = 2280312 \text{ } \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$$

Para efeitos de projeto a dosagem deverá ser a mesma da dosagem total encontrada. Assim estipulando-se o tempo de reação a ser empregada e vazão de tratamento pode-se variar o volume do reator e o valor da intensidade I .

5.4.3. – Consumo de Energia Elétrica

Para o cálculo do consumo de energia adotou-se um tempo de reação de 10,8 min.

Seguindo a EPA (1986):

- Densidade UV

A Densidade de UV, D, é definida como a potência nominal de UV (a 253,7 nm) dividida pelo volume útil do reator, V_r .

$$D = \text{saída total de UV} / V_r, \text{ expressa em W/L} \quad (4.9)$$

- Transmitância

A transmitância, obtida a 253,7 nm, do efluente pode ser determinada pela equação:

$$\% T = 100 \times 10^{-(\lambda / 2,3)} \quad (4.10)$$

Sendo,

T a transmitância;

λ o coeficiente de absorbância do UV, expresso em cm^{-1} ;

- Correção da Intensidade

Um importante ponto, para o projeto, é a correção da Intensidade média, levando-se consideração a vida útil das lâmpadas e a perda de energia ao passar pelos tubos de quartzo ou teflon que protegem as lâmpadas. A intensidade nominal é calculada pela expressão:

$$I_{nom} = I / F_p / F_t, \text{ expresso em } \mu\text{W}/\text{cm}^2 \quad (4.11)$$

Sendo,

I_{nom} a Intensidade nominal;

F_p o fator relacionado à vida útil da lâmpada

F_t o fator relacionado à perda de energia ao passar pelo quartzo ou teflon

Sendo, os valores propostos para F_p de 0,7 e F_t de 0,7 para quartzo e 0,6 para Teflon®.

- Cálculo do Consumo de Energia para o tratamento do efluente L.A:

Adotando-se um tempo de reação de 10,8 min segue-se os cálculos:

$$t_r = V_r / Q \text{ logo,}$$

$$V_r = 10,8 \text{ min} \times 60 \times 25 \text{ L/s}$$

$$V_r = 16200 \text{ L}$$

$$I_{nom} = 3519 / 0,7 / 0,7 = 7182 \mu\text{W}/\text{cm}^2$$

Da tabela 5.0, temos que a transmitância do efluente a 254 nm é de 75,87%, pela equação 4.10:

$$75,87 = 100 \times 10^{-(\lambda/2,3)}$$

$$0,7587 = 10^{-(\lambda/2,3)}, \text{ aplicando log}$$

$$\log 0,7587 = -(\lambda/2,3)$$

$$\lambda = 0,12 \times 2,3$$

$$\lambda = 0,27, \text{ ou seja, } 0,30 \text{ cm}^{-1}$$

Pela EPA (1986), para um $\lambda = 0,30$ e $I_{\text{nom}} = 7182$ tem-se que:

$$D = 2 \text{ W/L}$$

Como $V_r = 16200 \text{ L}$, multiplicando por D temos a potência de saída total de UV requerida:

$$P_{\text{saída}} = 16200 \text{ L} \times 2 \text{ W/L} = 32400 \text{ W}$$

Segundo fornecedor a lâmpada do reator possui uma $P_{\text{saída}}$ de 42 W e tem uma Potência, P , de 102 W.

Logo seria necessário:

$$n^{\circ} \text{ de lâmpadas} = 32400/42$$

$$n^{\circ} \text{ de lâmpadas} = 772$$

Para efeito de comparação pode ser adotado uma lâmpada de potência P de 65 W, segundo a EPA (1986) modelo G64T5L e possui uma $P_{\text{saída}}$ de 26,7 W.

Logo seria necessário:

$$n^{\circ} \text{ de lâmpadas} = 32400/26,7$$

$$n^{\circ} \text{ de lâmpadas} = 1214$$

5.5 – Cálculos de Custos.

Para efeito de cálculo de custos, tem-se duas alternativas, uma utilizando lâmpadas de 65 W, alternativa 1, e alternativa 2 com lâmpadas de 102 W. A partir dos cálculos anteriores onde o volume do reator deve ser de $16,2 \text{ m}^3$. Adotado-se a disposição das lâmpadas na vertical, e como a altura das mesmas é de aproximadamente 0,90 m, adota-se como altura da parede do reator de 1,3 m. Esse reator seria em concreto armado com comprimento de 11 m e 2,10 m de largura e nível de água em 0,90 m, totalizando um volume de $20,79 \text{ m}^3$. A figura 5.11 representa o croqui sugerido do reator para a alternativa 1 com a distribuição de 1260 lâmpadas, mais lâmpadas do que calculado anteriormente, para melhor preenchimento do espaço. Essa distribuição seguiu os exemplos apresentados na EPA (1986). Dessa forma o reator tem um volume útil de $16,24 \text{ m}^3$, pois se desconta o volume sem lâmpadas na entrada e saída, $3,78 \text{ m}^3$, e o volume das lâmpadas, $0,77 \text{ m}^3$.

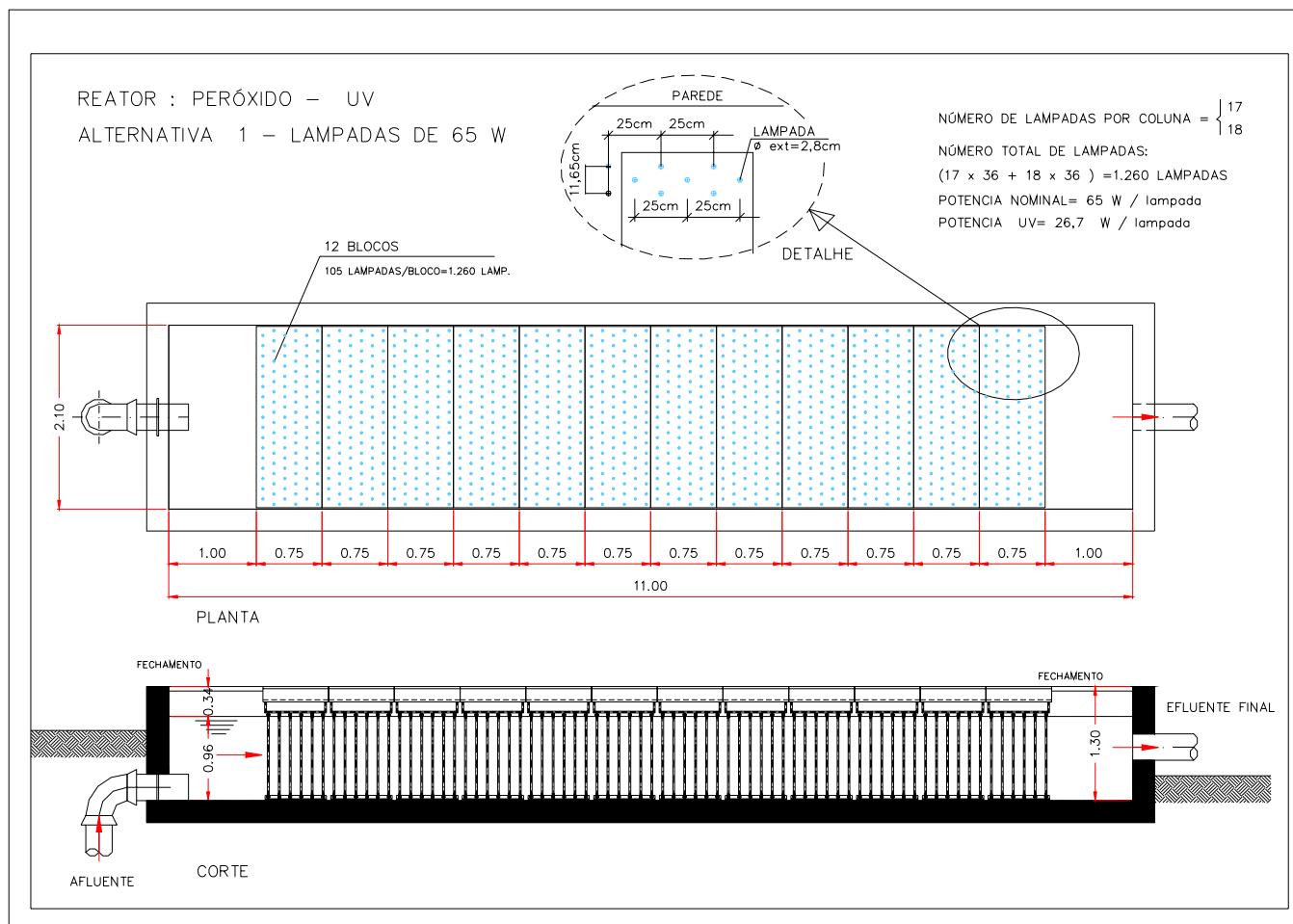


Figura 5.11: Alternativa 1 – Lâmpadas de 65 W

Para a alternativa 2, o volume do reator manteve-se igual, sendo a diferença na distribuição mais espaçada das lâmpadas, nesse caso 780 lâmpadas de 102 W. A figura 5.12 representa o croqui sugerido dessa alternativa 2.

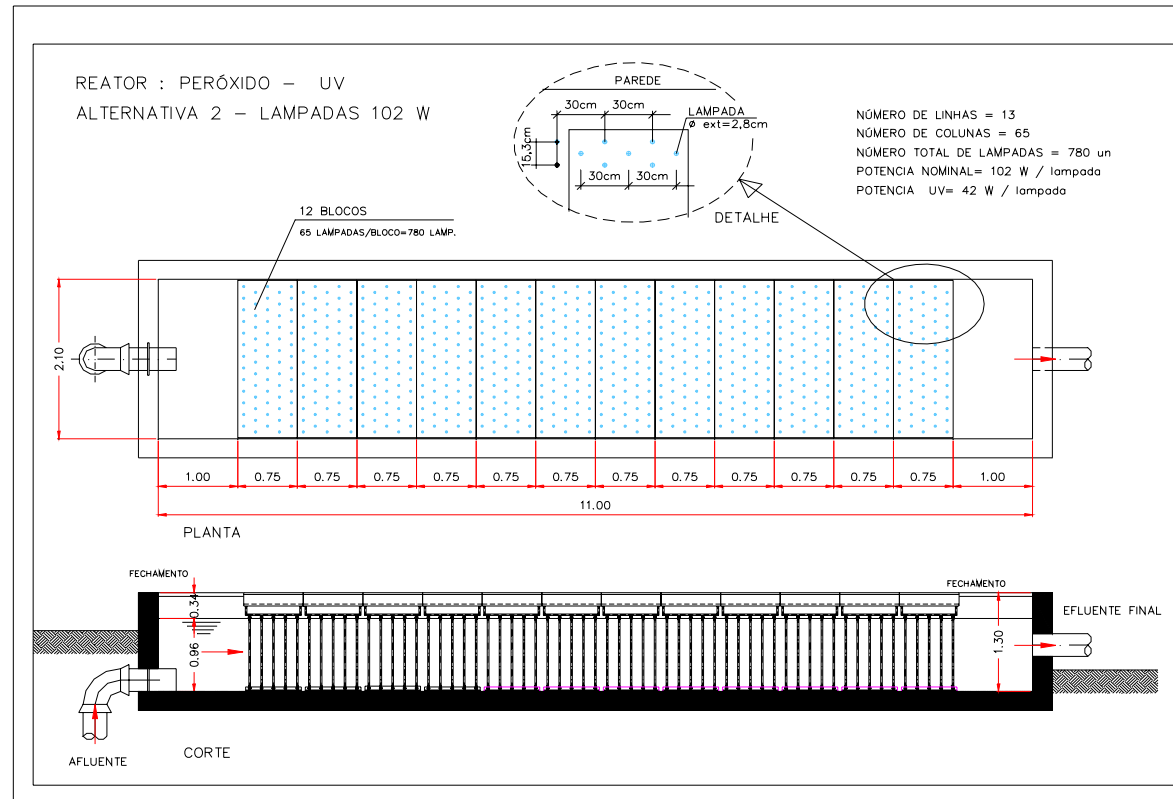


Figura 5.12: Alternativa 2 – Lâmpadas de 102 W

Para efeito de cálculos será dividido em custos para implantação e custos dos insumos.

- **Implantação**

Os custos de implantação referem-se ao investimento a ser feito com base nos projetos da alternativa 1 e 2. A tabela 5.12 mostra os custos de implantação para as duas alternativas.

Tabela 5.12: Custos de Implantação

			ALTERNATIVA 1			
ITEM		Unidade	Quantidade	Preço	Fonte	Custo (R\$)
1	Obra Civil	gb	16,30 m ³	500 R\$/ m ³	Opman Eng.	8150,00
2	Lâmpada de 65 W - GE	un	1260	110 R\$/ un	GE	138600,00
2.1	Montagem das Lâmpadas	gb	1260	38,50 R\$ / un	Opman Eng.	48510,00
3	Caixa de Distribuição em baixa tensão	gb	1	R\$ 600,00	Opman Eng.	600,00
4	Sistema Dosagem H ₂ O ₂	gb	1	R\$ 2000,00	Opman Eng.	2000,00
		TOTAL				197860,00
			ALTERNATIVA 2			
1	Obra Civil	gb	16,30 m ³	500 R\$/ m ³	Opman Eng.	8150,00
2	Lâmpada de 102 W - Trojan	un	780	653 R\$/ un	Tech Filter	509340,00
2.1	Montagem das Lâmpadas	gb	780	38,50 R\$ / un	Opman Eng.	30030,00
3	Caixa de Distribuição em baixa tensão	gb	1	R\$ 600,00	Opman Eng.	600,00
4	Sistema Dosagem H ₂ O ₂	gb	1	R\$ 2000,00	Opman Eng.	2000,00
		TOTAL				550120,00

NOTA: 1) Obra Civil para construção do reator com concreto acabado.

2) A montagem inclui a estrutura de cada bloco (fundo a prova d'água).

3) Caixa de distribuição elétrica em baixa tensão: caixa única para os 12 blocos de distribuição das lâmpadas, com uma entrada e 12 saídas.

4) Sistema de dosagem H₂O₂ inclui a aquisição da bomba e instalação.

- **Insumos**

Utilizando a expressão 4.12 calcula-se o consumo de energia:

$$\text{Consumo de energia (kWh)} = (\text{Potência (W)} \times \text{horas de uso por dia} \times \text{dias de uso no mês}) / 1000 \quad (4.12)$$

- Logo para a lâmpada de **102 W**:

$$\text{Consumo de energia} = (780 \times 102 \times 24 \times 30) / 1000$$

$$\text{Consumo de energia} = \mathbf{57283,20 \text{ kWh/mês}}$$

- Para a lâmpada de **65 W**:

$$\text{Consumo de energia} = (1260 \times 65 \times 24 \times 30) / 1000$$

$$\text{Consumo de energia} = \mathbf{58968,00 \text{ kWh/mês}}$$

Os Custos dos insumos a serem utilizados nos processos para as alternativas 1 e 2 podem ser vistos na tabela 5.13. Os mesmos foram calculados para o tratamento mensal do efluente da ETE, ou seja, 64800 m³ / mês.

Cabe ressaltar que como a ETE já existe e inclusive tem um tratamento terciário, logo a mão de obra atual fará a operação do sistema, logo não foi incluído nos cálculos de custo.

Tabela 5.13: Custos dos Insumos

ITEM	INSUMO	Unidade	ALTERNATIVA 1			
			Quantidade	Preço	Fonte	Custo (R\$)
1	H ₂ O ₂ a 50% massa	kg	3058,56	2,00 R\$/ kg	DEGUSSA	6117,12
2	Energia Elétrica	kWh	58968,00	0,142 R\$/ kWh	Eletropaulo	8373,46
		TOTAL				14490,58
			ALTERNATIVA 2			
1	H ₂ O ₂ a 50% massa	kg	3058,56	2,00 R\$/ kg	DEGUSSA	6117,12
2	Energia Elétrica	kWh	57283,20	0,142 R\$/ kWh	Eletropaulo	8134,21
		TOTAL				14251,33

Verifica-se que a melhor alternativa seria a 1, na qual lâmpadas de 65 W seriam utilizadas, pois o valor do investimento para implantação é menor. Já que como essas lâmpadas tem vida útil de 8000 h, aproximadamente a cada 12 meses as mesmas deverão ser trocadas e o preço destas lâmpadas é na ordem de 6 vezes menor quando comparada com a de 102 W. Logo mesmo utilizando-se praticamente 2 vezes mais lâmpadas o custo ainda é menor. Mesmo porque em termos de insumos o valor é praticamente igual.

Em relação ao custo para comparação com outros tipos de tratamentos calcula-se o valor em R\$/m³, logo o cálculo é o custo de implantação mais o custo dos insumos para o ano dividido pelo volume produzido. Logo para a alternativa 1, tem-se:

$$\text{Alternativa 1} = (197860 + (14490,58 \times 12)) / (64800 \times 12) = \mathbf{0,478 \text{ R\$ / m}^3}$$

Em relação a possíveis comparações de custos com outros tipos de tratamentos, deve-se avaliar também que o POA é um processo de degradação de compostos e não apenas de transferência de fase, não gerando resíduos sólidos como ocorre em outros tratamentos. Há um alto potencial de ser eficiente na destruição de protozoários, pois segundo VENCZEL (1997), devido a alta resistência de esporos de *Clostridium perfringens* aos processos de cloração os mesmos tem sido sugeridos como indicador de eficiência no tratamento de água sendo correlacionados com *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* e a vírus. E segundo estudo realizado por GUIMARÃES E BARRETO (2002), foi verificada a inativação de aproximadamente 98% de *Clostridium perfringens* e Colifagos pela ação de radicais hidroxila, utilizando um POA (TiO₂/UV).

Observa-se que o custo das lâmpadas é o principal fator de impacto no custo desse POA estudado, devido ao tempo de funcionamento e a quantidade e potência das lâmpadas. Logo, um estudo com diferentes tipos de lâmpadas, é interessante, pois poderá ocasionar uma diminuição dos custos desse POA .

6. CONCLUSÃO

• Pontos Positivos

Pelos resultados obtidos no presente estudo, conclui-se a peroxidação assistida por irradiação ultravioleta, H_2O_2 /UV, um entre os vários POA, é processo de tratamento de águas que pode ser aplicado com sucesso no tratamento do efluente da ETE Jesus Neto para fins de reuso.

Conforme o arranjo proposto nos ensaios, a melhor dosagem de H_2O_2 foi de 20 mg/L, com um tempo de exposição a Luz UV de 10,8 minutos. Nessas condições a eficiência de remoção de cada parâmetro estudado foi de aproximadamente:

- 50 a 60% de Cor aparente, mesmo levando-se em consideração o método de análise não corresponder com o visualizado;
- 50 a 60% de DQO
- 40% de COT
- 20 a 30% de Turbidez
- Inativação de Coliformes

Também, mesmo que o custo aparente do tratamento proposto seja maior que àquele que está sendo utilizado atualmente na ETE, o presente trabalho demonstrou a eficiência na degradação de compostos orgânicos específicos de alto potencial tóxico, atingindo-se reduções de até 97% em relação ao valor inicial para BETX. Demonstrando o alto poder de oxidação do processo estudado.

- **Pontos Negativos**

Observa-se que para atender as metas adotadas para a água de reuso, independente do tratamento a ser utilizado, deve-se levar em consideração a boa eficiência no tratamento biológico do esgoto. Pois, a idéia não é ter um processo de tratamento físico-químico e sim a conjugação de ambos os processos, inclusive diminuindo-se os custos.

A análise do parâmetro Cor demonstrou ser um ponto a ser discutido pois dependendo do método empregado atinge-se ou não o padrão estabelecido. Logo, um método deve ser estudado para que se torne referência ao estabelecer-se metas para aplicação em águas destinadas ao reuso.

- **Recomendações para Próximos Trabalhos**

Estudar a utilização de diferentes tipos de lâmpadas seria fundamental para tentar otimizar ainda mais os custos.

Realizar um projeto piloto, com a construção de um reator para tratar uma parte desse efluente continuamente, deve ser desenvolvido. Pois poderá ser estudado a parte operacional do sistema, como desgaste das lâmpadas, limpeza do sistema, variação da qualidade da água de reuso produzida.

Verificar a eficiência na destruição de protozoários, tendo como indicadores *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* e vírus.

Avaliar a cinética e degradação de compostos orgânicos específicos, como BETX, fenol e pesticidas, bem como a formação e potencial de toxicidade dos subprodutos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA-AWWA. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 20^a. ed., Washington DC: American Public Health Association-American Water Works Association, 1998.

ARAUJO, R. N. **Degradação do corante azul reativo 19 usando UV; H₂O₂; UV/H₂O₂; Fenton e Foto-Fenton. Aplicação em efluentes têxteis**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2002.

AWWA. **Water Quality and Treatment**, 4^a. ed., American Water Works Association, 1990.

DOMÈNECH, X., JARDIM, W. F., LITTER, M. I. **Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes**. In: Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogênea, cap. 1, *Rede CYTED*, La Plata, 2001.

ELETROPAULO (2003). **Tarifas**. Disponível no site da Eletropaulo.

URL: <http://www.eletropaulo.com.br>

(Acessada em Abril de 2003)

EPA. **Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual**. Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, 1999.

EPA. **Advanced Photochemical Oxidation Processes Handbook**. Cincinnati: Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, 1998.

EPA. **Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection**. Cincinnati: Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, 1986.

FUJISHIMA, A., HASHIMOTO, K. e WATANABE, T. (1999). **TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications**. BKC, Inc., Koyo Printing Co., Ltd., Tokyo, Japão.

GALINDO, C., JACQUES, P., KALT, A. (2001). **Photochemical and photocatalytic degradation of an indigoid dye: a case study of acid blue 74 (AB 74)**. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **141**, 47-56.

GUIMARÃES, J. R., BARRETO, A. S. (2002). **Photocatalytic inactivation of *Clostridium perfringens* and Coliphages in water**. artigo submetido ao Brazilian Journal of Chemical Engineering.

GUIMÉNEZ, J., ESPLUGAS, S., CONTRERAS, S., PASCUAL, E., RODRÍGUEZ, M. (2002). **Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation**. *Water Research*, **36**, 1034-1042.

HUANG, C. P., DONG, C., TANG, Z. (1993). **Advanced Chemical Oxidation: Its Present role and Potential future in hazardous waste treatment**. *Waste Management*, **13**, 361-377.

INCE, N. H., TEZCANLI, G. (1999). **Treatability of textile dye-bath effluents by advanced oxidation: Preparation for reuse.** *Water Science and Technology*, **40** (1), 183-190.

JARDIM, W. F., LITTER, M. I. **Apostila "Nuevos Avances en Tratamientos de Efluentes Acuáticos: Tecnologías de Oxidación Avanzada".** Concepcion, 2002.

MANCUSO, P.C.S. **Reuso de Água.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo, 1998.

MANCUSO, P.C.S. **Reuso de Água e sua Possibilidade Na Região Metropolitana de São Paulo.** Dissertação de Doutorado. Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo, 1992.

MARTÍN, C. A., ALFANO, O. M., CASSANO, A. E. (2001). **Water decolorization using UV radiation and hydrogen peroxide: a kinetic study.** *Water Science and Technology*, **44** (5), 53-60.

NOGUEIRA, R. F. P., GUIMARÃES, J. R. (1999). **Photodegradation of dichloroacetic acid and 2,4-dichlorophenol by ferrioxalate/ H₂O₂ system.** *Water Research*, **34** (3), 895-901.

OKUN, D. A. (1991) **Reclaimed Water – An Urban Water Resource.** *Water Science and Technology*, **24** (9), 353-362.

OLIVEIRA, M. C., NOGUEIRA, R. F. P., GOMES NETO, J.A., JARDIM, W. F., ROHWEDDER, J. J. R. (2001). **Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio em processo de fotodegradação por reação de foto-Fenton.** *Química Nova*, **24** (2), 188-190.

PERÉZ, M., TORRADES, F., DOMÈNECH, X., PERAL, J. (2002). **Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents.** *Water Research*, **36**, 2703-2710.

PIRES, M. R. **Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta: Influência da qualidade do efluente e da fotorreativação.** Dissertação de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2002.

REUSO DE ÁGUA. (2003). **Exemplos**

URL: <http://www.reusodeagua.hpg.ig.com.br/index.htm>

(Acessada em Junho de 2003)

SABESP. (2002). **Manual da ETE Engenheiro João Pedro de Jesus Netto.**

SABESP. (2002). **Relatório Gerencial da Divisão de Controle Sanitário Centro.**

SHUVAL, H, I. **Water Renovation and Reuse**, Nova York: Academic Press, 1977, 463 p.

US PEROXIDE (2001-2003). **BOD and COD redution using hydrogen peroxide.**

Disponível no site da US Peroxide.

URL: <http://h2o2.com>

(Acessada de Julho de 2001 a Abril de 2003)

VENCZEL, L.V., ARROWOOD, M., HURD, M., SOBSEY, M.D. (1997). **Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts and *Clostridium perfringens* spores by a mixed-oxidant disinfectant and by free chlorine.** Applied and Environmental Microbiology, **63**, 1598-1601.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, Vol 1, 2ª ed., Belo Horizonte: SEGRAC, 1996.

WATTS, R.J., KONG, S., ORR, M.P., MILLER, G.C., HENRY, B.E. (1995) **Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent.** *Water Research*, **29** (1), 95-100.

WEBER W. J., Jr., LeBOUEF E. J. (1999). **Processes for advanced treatment of Water.** *Water Science and Technology*, **40** (4-5), 11-19.

ANEXO I

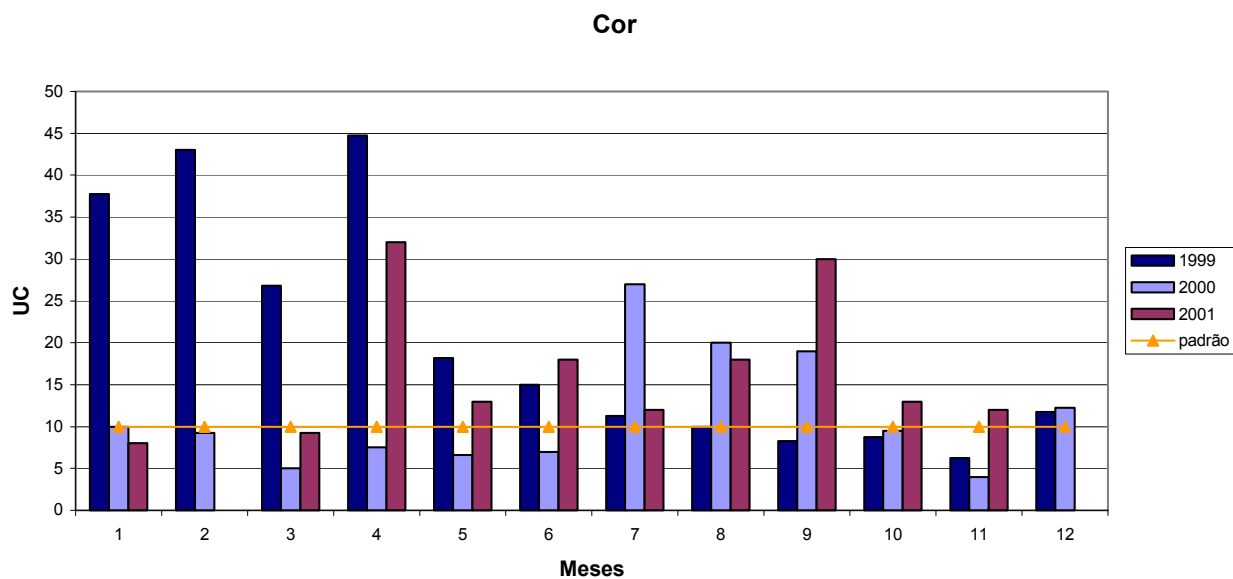


Figura 9.1: Resultados de Cor Aparente da Água de Reuso

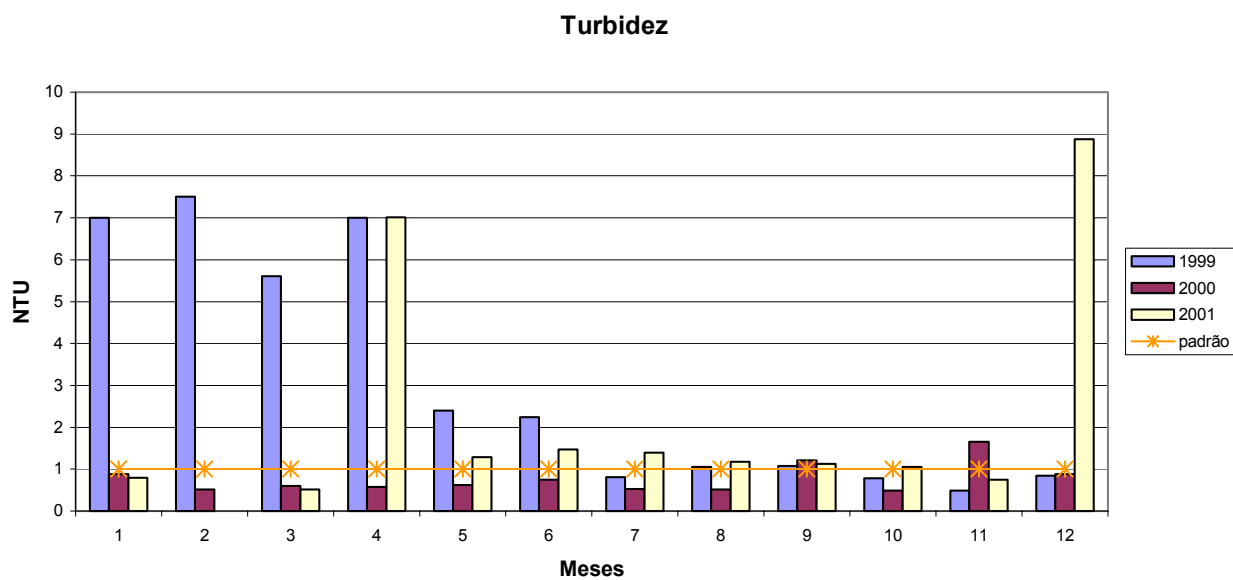


Figura 9.2: Resultados de Turbidez da Água de Reuso

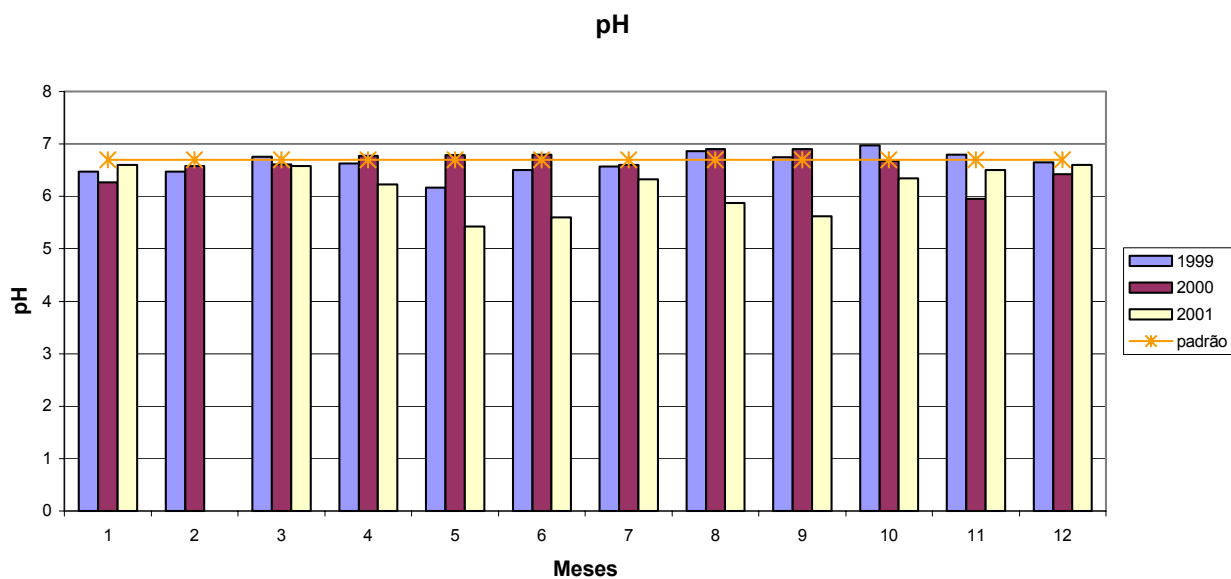


Figura 9.3: Resultados de pH da Água de Reuso

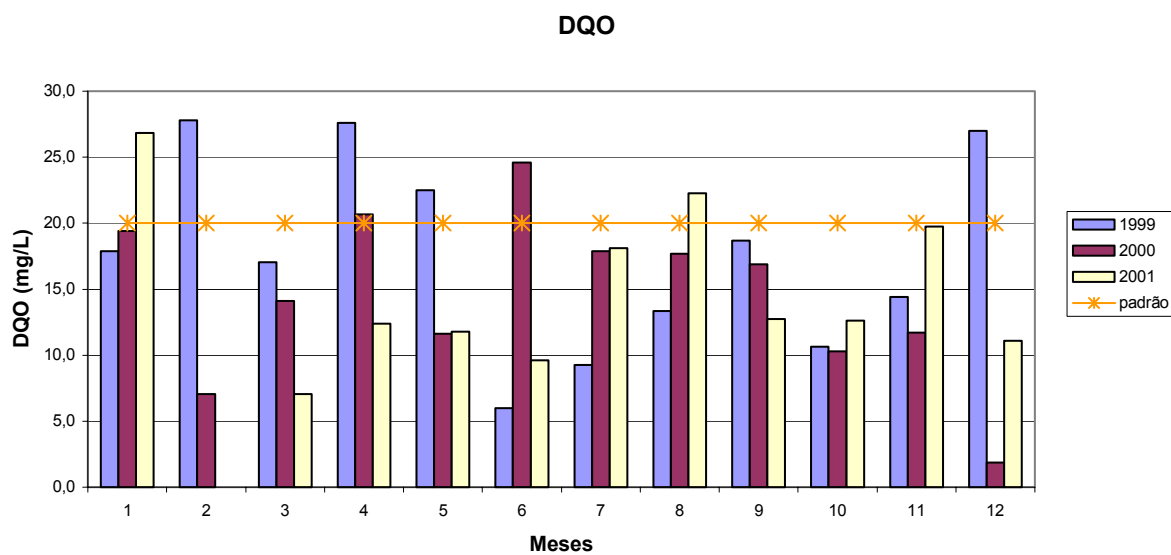


Figura 9.4: Resultados de DQO da Água de Reuso

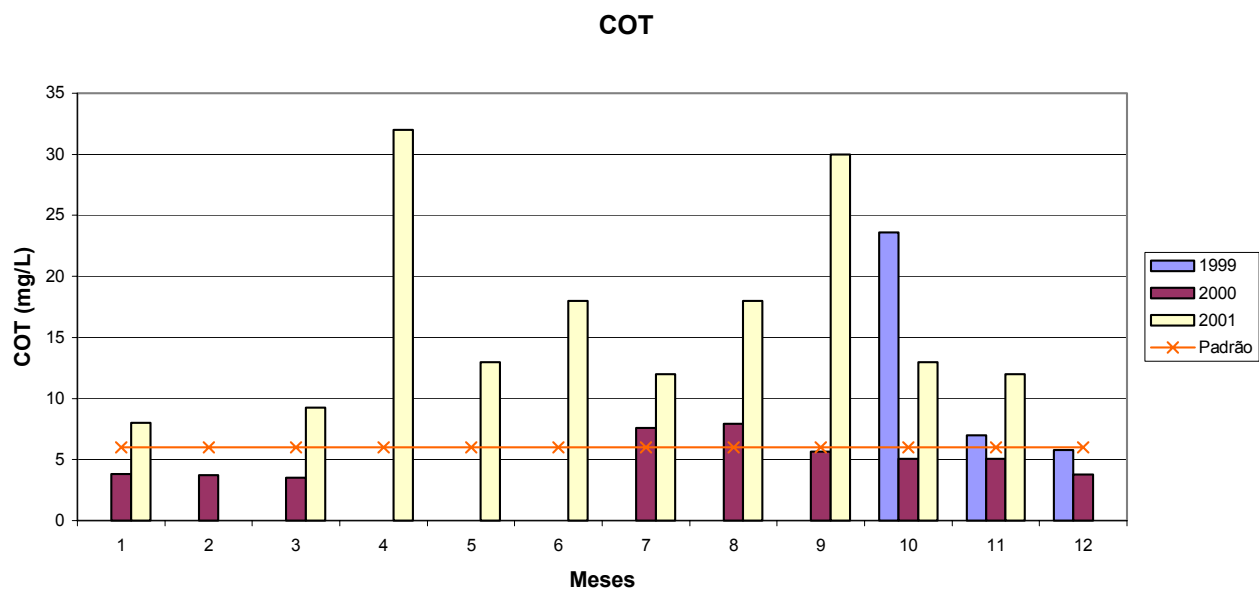


Figura 9.5: Resultados de COT da Água de Reuso

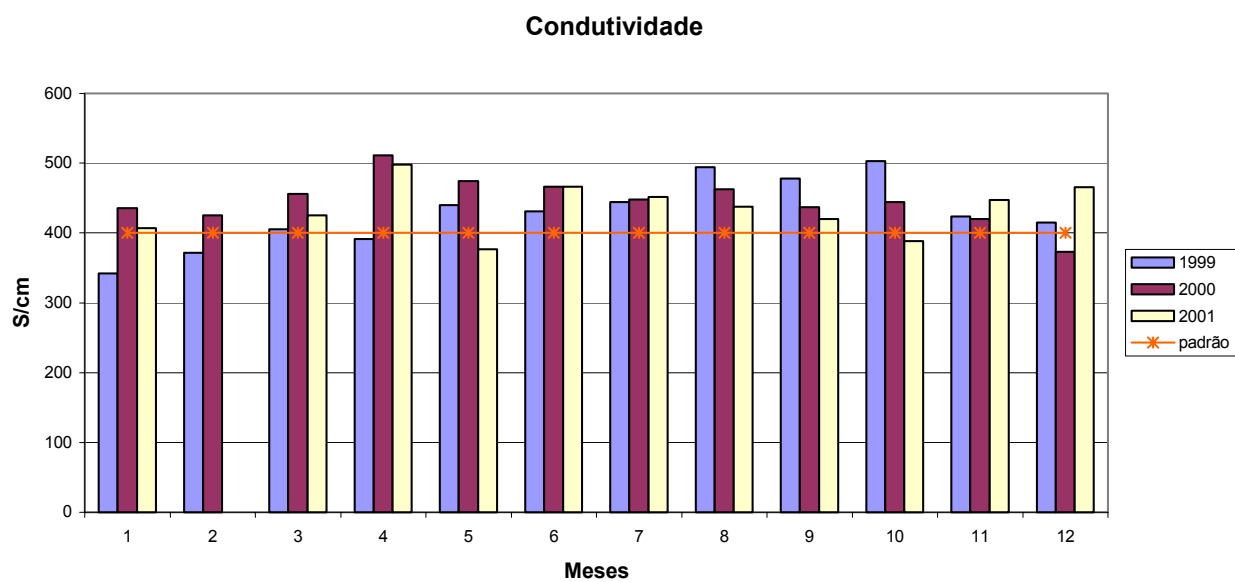


Figura 9.6: Resultados de Condutividade da Água de Reuso

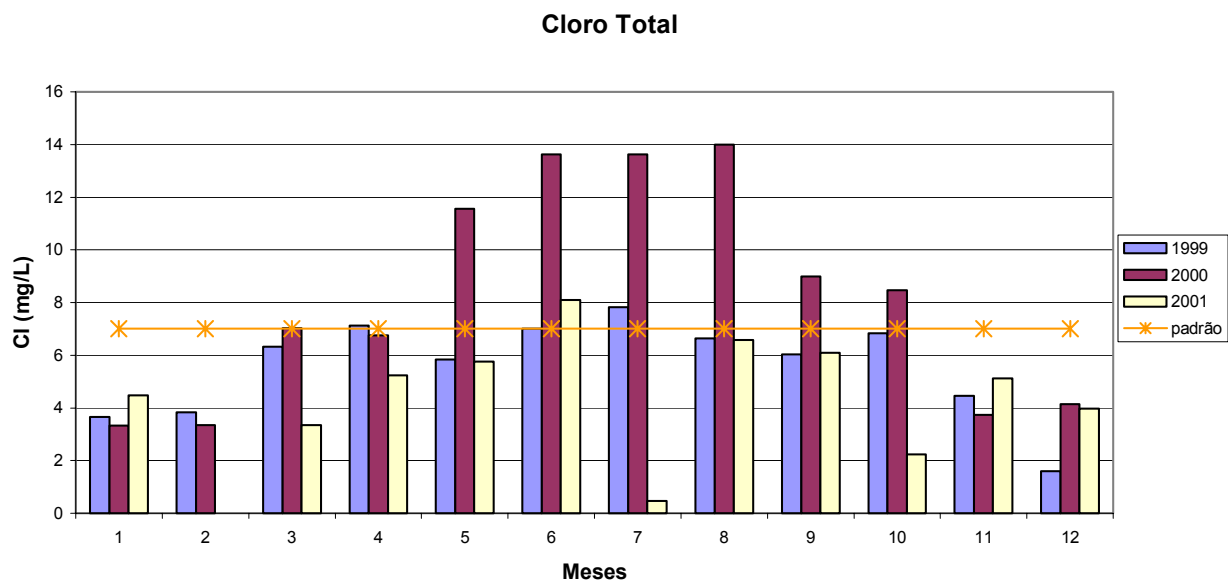


Figura 9.7: Resultados de Cloro Total da Água de Reuso

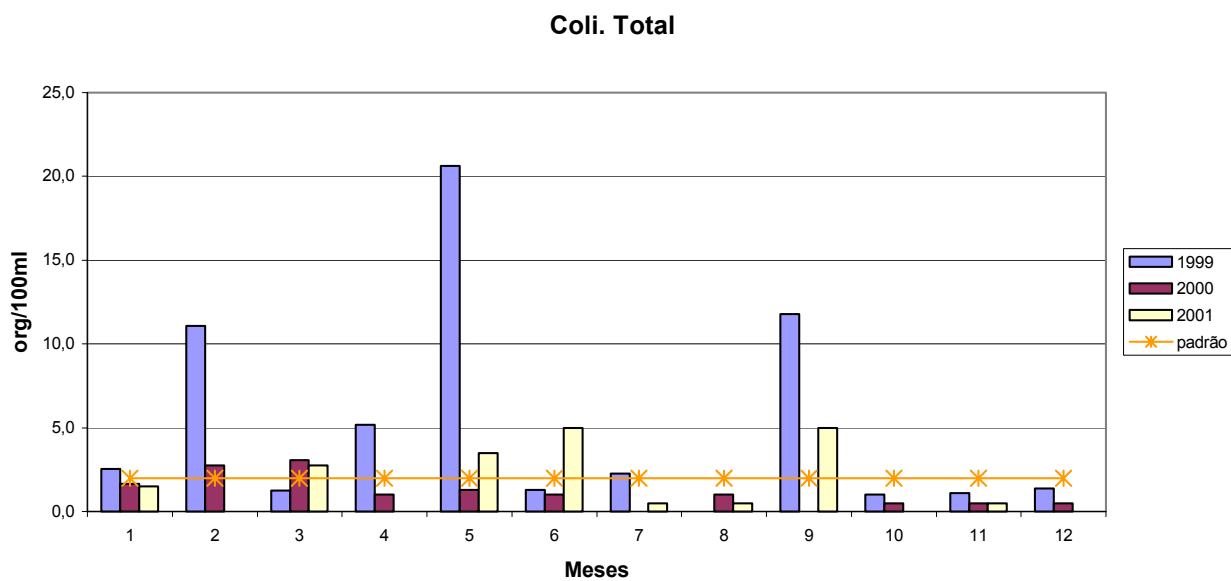


Figura 9.8: Resultados de Coliformes Totais da Água de Reuso

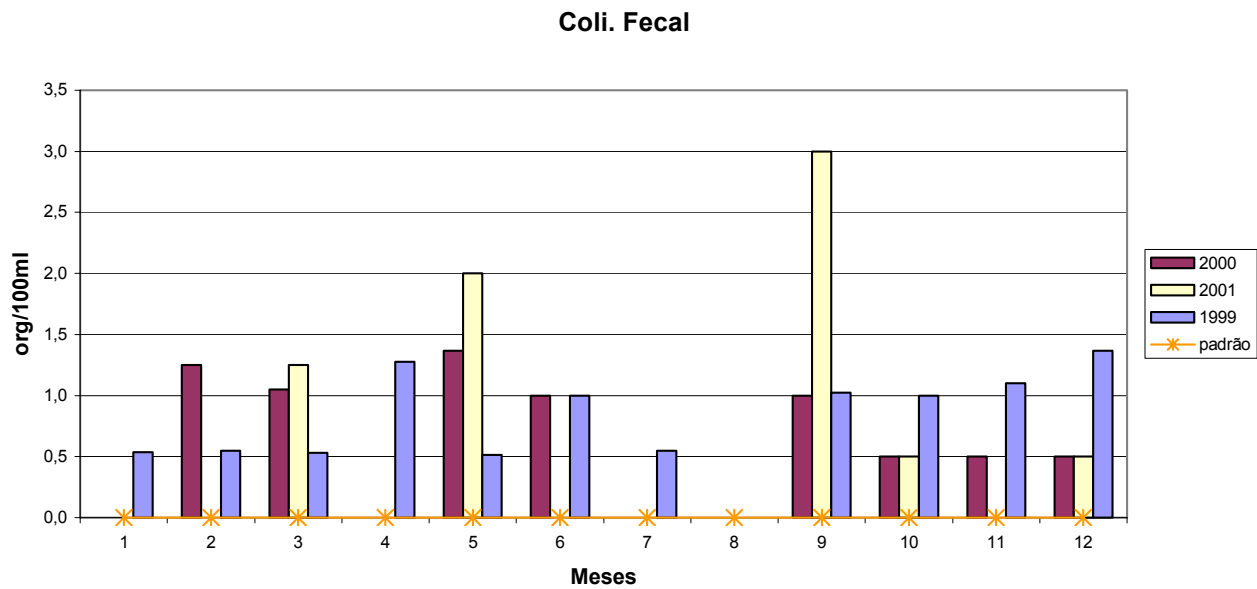


Figura 9.9: Resultados de Coliformes Fecais da Água de Reuso